

# **TENDENCIAS INVESTIGATIVAS EN EL DESARROLLO DE PRODUCTOS MECATRONICOS EN LA ACTUALIDAD**

## *RESEARCH TRENDS IN THE MECHATRONIC PRODUCTS DEVELOPMENT CURRENTLY*

**Ruben Dario Solarte Bolaños**

Sena, Tecnoparque Nodo Pitalito, Colombia  
*rubendariosolarte@gmail.com*

**Antonio Carlos Valdiero**

Universidade Federal De Santa Catarina, Brasil  
*antoniocvaldiero@gmail.com*

**Luiz Antônio Rasia**

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil  
*luizrasia@msn.com*

**Jose Alexander Dueñas Salazar**

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil  
*jose\_alexander33@hotmail.com*

Recepción: 29/octubre/2020

Aceptación: 3/diciembre/2020

### **Resumen**

La mecatrónica es un campo interdisciplinario de ciencias de la ingeniería caracterizado por la integración e interconexión entre la ingeniería mecánica, la ingeniería eléctrica y la informática. Los productos mecatrónicos son en su mayoría estructuralmente complejos, pero son una solución óptima para muchos campos de la Industria como la medicina, la agricultura, la agroindustria entre otros. Este artículo tiene como objetivo principal identificar las tendencias investigativas en los proyectos mecatrónicos NPD en la actualidad. Para ello se hace una revisión bibliográfica, citando trabajos importantes en el área a partir del año 2017 y abordando el objetivo principal de cada investigación, para así agruparlas en enfoques e identificar las tendencias investigativas actualmente. Al final se puede concluir que la tendencia es reducir el costo total en un producto mecatrónico, así como de comenzar a adaptar conceptos de las nuevas tecnologías de la Industria 4.0 (I4.0) a los proyectos de desarrollo de nuevos productos mecatrónicos (NPD).

**Palabras Clave:** Enfoques investigativos, NPD, proyecto mecatrónico, tendencia investigativa.

## **Abstract**

*Mechatronics is an interdisciplinary field of engineering sciences characterized by the integration and interconnection between mechanical engineering, electrical engineering, and computer science. Mechatronic products are mostly structurally complex, but they are an optimal solution for many fields of Industry such as medicine, agriculture, agroindustry among others. The main objective of this paper is to identify research trends in the development of mechatronics products today. To meet this objective, a bibliographic review is made, citing important works in the area from 2017 on and addressing the main objective of each investigation in order to group them into approaches and identify current investigative trends. In the end, it can be concluded that the trend is to reduce the total cost of a mechatronic product, as well as to begin to adapt the concepts of the new technologies of Industry 4.0 (I4.0) to mechatronic NPD (new project development) projects.*

**Keywords:** *investigative approaches, NPD, Mechatronic Project, Research trend.*

## **1. Introducción**

A medida que la producción industrial se vuelve más compleja, aumentan las necesidades de conocimiento mecatrónico [Stankovski, 2019]. El diseño y desarrollo de sistemas mecatrónicos es un desafío al considerar su composición interdisciplinaria [Tamm, 2019].

En el proceso de desarrollo de nuevos productos, múltiples dominios de ingeniería con fuertes interdependencias están involucrados y deben considerarse de manera integral. [Lenz, 2018]; [Tamm, 2019]. Con la llegada de las tecnologías de la cuarta revolución industrial (I4.0), los productos mecatrónicos se tornan más relevantes y se tornan más complejos. Un concepto relevante en las tecnologías I4.0 son los Sistemas de Producción Ciber-Físicos (CPPS) los cuales se basan principalmente en la interpolación de la mecatrónica y los Sistemas Ciber-Físicos (CPS) [Mhenni, 2018].

## **2. Métodos**

En esta sección se listan conceptos necesarios para abordar el objetivo principal de este artículo, dichos conceptos se exponen en un contexto actual citando trabajos de los últimos años.

Los productos mecatrónicos cada vez se integran más en red y se comunican. Estos productos generan, intercambian y usan datos para cumplir funcionalidades futuras [Gogineni, 2019]. El diseño de productos mecatrónicos está en constante cambio, por ello es necesario identificar el horizonte hacia donde el diseño de productos mecatrónicos está yendo.

Con el fin de identificar la tendencia o direccionamiento de los proyectos mecatrónicos NPD en la actualidad, es hecha una revisión bibliográfica en este documento, la cual permite identificar los objetivos principales de cada artículo, con lo que se agrupan trabajos con abordajes similares en enfoques. A cada enfoque se le asigna un valor numérico referente al número de citas por año. Con el valor numérico se procede a calcular la pendiente entre los años 2017 y 2020 de cada enfoque, y se toma la pendiente como indicador de la tendencia investigativa en la actualidad.

### **Productos Mecatrónicos**

Hehenberger [Hehenberger, 2014] define la mecatrónica como un campo interdisciplinario de ciencias de la ingeniería caracterizado por la integración e interconexión entre la ingeniería mecánica, la ingeniería eléctrica y la informática. [Fotso, 2012] utiliza el concepto de mecatrónica como la combinación sinérgica entre ingeniería mecánica, eléctrica, informática y tecnología de la información, que incluye sistemas de control como los métodos numéricos utilizados para diseñar productos inteligentes integrados. Por lo tanto, en general, todos los productos mecatrónicos tienen la similitud de la presencia de las áreas de mecánica, electrónica y software en su estructura de diseño.

Hehenberger [Hehenberger, 2010] argumenta una regla general de que los sistemas y productos mecatrónicos se consideran complejos porque incluye muchos enlaces internos entre sus diferentes dominios. Ahmadinejad and Afshar [Ahmadinejad,

2011] argumentan que los productos mecatrónicos son productos complejos debido a su naturaleza multidisciplinaria inherente y, por lo tanto, el control de la complejidad en el proceso de NPD atrae mucha atención.

La investigación en el desarrollo de productos mecatrónicos se presenta en muchas áreas técnicas: a) Automatización b) Robótica c) Servo-mecanismos d) Sistemas de control e) Ingeniería automotriz f) Controles de computadora-máquina g) Productos de consumo h) Fabricación asistida e integrada por computadora sistemas i) Sistemas de ingeniería y fabricación j) Embalaje k) Control de movimiento l) Inteligencia m) Control g) sensores e i) actuadores [Stankovski, 2019].

Con la incursión de nuevos conceptos como IIoT (Internet Industrial de las cosas), IOT (Internet de las cosas), SM (Sistemas inteligentes de manufactura), almacenamiento en la nube y otros en el área del desarrollo y producción de productos mecatrónicos, implica que dichos productos se tornen cada vez más complejos. Y según Jacobs and Swink [Jacobs, 2011], la alta complejidad de un producto puede afectar las áreas de fabricación, inventario y distribución y, en consecuencia, los costos de producción.

### **Proyectos de desarrollo de nuevos productos**

El desarrollo de nuevos productos conocido más comúnmente por sus siglas en inglés NPD (New Product Development) es un proceso o hoja de ruta que guía un nuevo producto desde la ideación hasta el lanzamiento del producto [Chen, 2003]. Las actividades en los proyectos NPD son complejas e interdisciplinarias, la cual requiere entradas de numerosos dominios de conocimiento [Chen, 2003].

Los proyectos NPD son considerados como el motor de ventas, participación de mercado y ganancias en una compañía [Meysam, 2013]. Según [Meysam, 2013] las características clave de este tipo de proyectos son: (a) novedad tecnológica, (b) visibilidad del producto, (c) velocidad de desarrollo, (d) constante cambio y (e) alto riesgo.

Tomando como foco los procesos NPD de productos mecatrónicos, [Tamm, 2019] y [Lenz 2018] argumenta que el diseño y desarrollo de sistemas mecatrónicos es un desafío actual, ya que en este tipo de procesos de desarrollo, múltiples dominios de

ingeniería con fuertes interdependencias están involucrados y deben considerarse holísticamente.

Según [Weber, 2005] en las empresas NPD de países altamente industrializados (por lo tanto, "caros"), existen dos posibles estrategias básicas para hacer frente a la competencia y conseguir el éxito:

- Estrategia económica: disminuir el costo, al trasladar la producción a sitios de bajo costo.
- Estrategia técnica: mantener los altos precios necesarios para cubrir los altos costos de producción (e ingeniería) ofreciendo mejores productos y sistemas.

Se puede argumentar que debido a que los requisitos funcionales en un producto mecatrónico a partir de la llegada de las nuevas tecnologías de la I4.0 son cada vez mayores, lo que conlleva a que los proyectos NPD mecatrónicos se tornen más complejos y difíciles de liderar [Attaran, 2017]; [Mhenni, 2018]; [Penas, 2017]; [Tantawi, 2019].

### **3. Resultados**

En esta sección se exponen trabajos de investigación centrados en el desarrollo de proyectos de nuevos productos mecatrónicos. El listado de los trabajos se hace en un orden cronológico (desde el año 2017). En la búsqueda se exploraron las bases de datos como Science direct, Scopus y la IEEE, resaltando como palabras claves "proyecto mecatrónico" y "NPD".

Rad and Hancu [Rad, 2017] presenta una metodología de modelado e identificación de parámetros de una unidad de accionamiento lineal servo-neumática. [Saravanakumar, 2017] muestra un extenso estudio sobre diversos desarrollos en el control de posicionamiento de cilindros neumáticos. [Deng, 2017] presenta un sistema CNC abierto basado en la plataforma integrada de baja potencia, denominado CNC abierto y de alto rendimiento (OHP-CNC). En [Lara, 2017], un sistema de mecatrónica de bajo costo (prótesis de miembro superior) es expuesto. Anuar [Anuar, 2017] propone el desarrollo de un sistema simple de bajo costo para rastrear el sistema de movimiento de la extremidad superior humana con una

precisión y respetabilidad relativamente satisfactorias. [Penas, 2017] describe el contexto de la extensión de los sistemas mecatrónicos a los ciber-físicos (CPS), primero destacando sus similitudes y diferencias, y luego subrayando las necesidades actuales del CPS en el sector manufacturero. Liu [Liu, 2017] presenta una arquitectura escalable orientada a servicios, técnicas de virtualización y métodos de comunicación en la nube para fabricación en CPSs. Quatrano [Quatrano, 2017] desarrolla un esquema de control mediante el uso de la plataforma ARDUINO y así adecuar una máquina (no usada) para realizar operaciones de fabricación simples. Ruzanov [Ruzanov, 2017] propone un método que mejorar la precisión de los sistemas mecatrónicos utilizados para mediciones de geometría compleja.

Grigoriev and Martinov [Grigoriev, 2018] propusieron un enfoque para crear clientes terminales en el sistema CNC que permite resolver la tarea de control de múltiples terminales de la máquina CNC. En [Moulianitis, 2018], se propone un índice de la mecatrónica para evaluar la complejidad de un producto mecatrónico con el objetivo de ver cómo se comportan los costos en relación a esta variable. [Ye, 2018] propone un enfoque de diseño y desarrollo de una base de conocimiento del proceso de mecanizado CNC utilizando tecnologías en la nube. Ye [Ye, 2018] expone una relación de mapeo específica entre STEP-NC y OWL que puede convertir el formato STEP-NC a OWL y hacer que el almacenamiento de conocimiento sea aplicable en HBase. Saravanakumar [Saravanakumar, 2018] presenta una investigación, donde se intenta mejorar la precisión del actuador neumático con poca reducción en su velocidad al interconectar dos cilindros neumáticos para formar un manipulador lineal en serie. Mcharek [Mcharek, 2018] expone un método orientado en Ingeniería basada en el conocimiento. El método tiene dos características clave. Primero, apoyar a los diseñadores en los diferentes pasos del ciclo de diseño; y segundo, reutilizar los resultados del diseño y adaptarlos a los cambios de requisitos. En [Valencia, 2018], se presenta el diseño construcción de una prótesis de rodilla de bajo costo que presenta parámetros aceptables de funcionamiento. Bula [Bula, 2018] presenta un modelo de para construir un robot a partir de materiales informáticos antiguos. Martinov [Martinov, 2018] presentó un enfoque para

desarrollar sistemas CNC basados en ARM de bajo costo mediante el control de unidades CAN (Controller Area Network). En [Martinova, 2018] se propone un enfoque con el uso de ciclos fijos, que permite unificar el proceso de programación de diálogo para máquinas con sistemas CNC de diferentes fabricantes. En [Mhenni, 2018], se propone un proceso de diseño conjunto CPPS (Cyber Physical Production System) basado en sistemas mecatrónicos y CPS. [Bobka, 2018] muestra cómo las redes neuronales artificiales (ANN) pueden usarse para mejorar la precisión de montaje en sistemas de ensamblaje automatizados. Gheorghe [Gheorghe, 2018] muestra las arquitecturas estructurales y modulares para el diseño de sistemas mecatrónicos inteligentes, una mezcla entre sistemas mecatrónicos y cibernéticos utilizados en laboratorios y en la industria. En [Lenz, 2018]; [Tamm, 2019] se expone un enfoque holístico para el diseño y la optimización de un sistema mecánico o mecatrónico. Lenz y Tamm [Lenz, 2018]; [Tamm, 2019] demostraron que es posible reducir el peso y las vibraciones mientras se mantiene la rigidez estática en un producto mecánico o mecatrónico.

Zheng [Zheng, 2019] propone un método de diseño de configuración para sistemas mecatrónicos en el contexto de la fabricación industrial. La efectividad y aplicabilidad del método de diseño de configuración propuesto se demuestra con un sistema de soldadura robótica. Menezes [Menezes, 2019] propone una metodología para la identificación y diseño (ID) de operaciones inteligentes en la fabricación. El estudio de ID considera los elementos de la Industria 4.0 (I4.0) como robots autónomos, análisis avanzado, integración de sistemas, detección de alta gama, big data, internet de las cosas, computación en la nube e interacciones hombre-máquina. En [Emilia, 2019] se describe un procedimiento que apunta a la reducción de los efectos de las causas de variabilidad, que afectan el flujo de control avanzado para un sistema mecatrónico utilizado como parte de los sistemas CPS, en un contexto de Industria 4.0. En [Vij et al., 2019] se propone una solución para el riego de la granja utilizando IoT (Internet de las cosas) y técnicas de aprendizaje automático, se debe establecer un campo de red de sensores inalámbricos en todo el campo de la granja o incluso en el jardín del hogar para monitorear todas las partes del campo. [Barbalho, 2019] presentó una investigación en donde los objetivos son investigar

la relación entre la complejidad del producto mecatrónico y la antigüedad del equipo como parámetros de planificación para el nuevo proyecto de desarrollo de productos, explorando el efecto en el rendimiento del proyecto. En [Gogineni, 2019] se presenta una metodología sistemática de desarrollo de productos para desarrollar dispositivos IoT personalizables, que implican más procesos que un producto mecatrónico producido en masa. En [Fati, 2019], el robot Pick and Place se ha integrado con tecnología GSM, equipo de identificación por radiofrecuencia (RFID) y tecnología sensorial para mejorar la funcionalidad del robot. En [Chouinard, 2019] se introduce un índice de dependencia relacionado con el producto que se puede usar durante el diseño conceptual de los sistemas mecatrónicos. En [Chan, 2019]; [Qiu, 2020) se presentan el diseño y la construcción de dos prototipos de mecatrónica inteligente: 1) sistema de aislamiento de base mecatrónica inteligente que utiliza el sistema de alerta temprana de terremotos (EEW) para la activación 2) Carcasa inteligente (MSS) que tiene la capacidad de realizar un monitoreo de impacto a gran escala del vehículo de vuelo estructuras con peso ligero y bajo consumo de energía. En [Mohebbi et al., 2019] se presenta una metodología de diseño que ofrece un punto de vista integrado, concurrente y basado en el sistema para el diseño mecatrónico, que difiere de las metodologías de diseño secuencial no óptimas. Mcharek [Mcharek, 2019] describe una metodología para armonizar el ciclo de diseño de sistemas mecatrónicos. Yao [Yao, 2019] propone un nuevo tipo de sistema CNC denominado sistema de control numérico invisible (INC) para simplificar la arquitectura CNC y mejorar la flexibilidad de la arquitectura CNC y la reutilización de funciones. En [Wasif, 2019] se expone una máquina de grabado CNC con Arduino Uno. El propósito de esta mini-máquina CNC es grabar sobre materiales acrílicos con precisión y bajo costo. Gravalos [Gravalos, 2019] muestra el diseño y la implementación de un novedoso sistema mecatrónico, mediante el cual los tratamientos de cobertura y succión pueden realizarse automáticamente. El sistema mecatrónico y su equipo auxiliar se montaron en una plataforma móvil de tres ruedas. Li and Zhang [Li, 2019] con el fin de hacer un diseño de control optimizado para el sistema mecatrónico, se explora un modelo simplificado, utilizando la técnica de reducción de orden del modelo, que puede preservar los

parámetros físicos dominantes y revelar los factores limitantes del rendimiento. En [Gao, 2019], se presenta un controlador CNC inteligente con una estructura jerárquica. En la capa superior, se aplica el sistema de planificación del proceso de mecanizado con tecnología en la nube. Martinov [Martinov, 2019] sugirió un enfoque universal para la integración de soluciones internas y de terceros en un sistema CNC, incluida su interacción en el sistema.

[Martinov, 2020] propuso una arquitectura de un sistema CNC configurable que permite, por un lado, configurar y reconfigurar el sistema CNC (si es necesario sobre la marcha) de diferentes maneras, desde "clásico" hasta en la "nube", y por otro lado, proporcionando Máxima potencia informática. Esto no requiere ningún cambio en el hardware y el software del sistema CNC. [Židek, 2020] exploró la implementación de tecnologías de visión avanzadas para las partes sin contacto de la inspección del producto y la identificación automática de objetos utilizando RFID durante el proceso de ensamblaje en una línea de ensamblaje experimental para mejorar el control de calidad sobre el ensamblaje de las diferentes partes del producto. Gualtieri [Gualtieri, 2020a] presenta y discute el potencial y los desafíos principales de la automatización de la fabricación en pequeñas y medianas empresas (PYME) a través de la seguridad y la ergonomía en la colaboración humano-robot (HRC). Gualtieri [Gualtieri, 2020b] muestra un estudio de caso de ensamblaje colaborativo humano-robot aplicado a la producción de un cilindro neumático en un laboratorio de una fábrica de aprendizaje. En [Ramesh, 2020] es desarrollado un robot semiautomático para sembrar semillas en función del espacio y la profundidad de las semillas, al tiempo que regula el riego de las plantas.

Los autores por medio del estudio de cada artículo agruparon siete tipos de trabajos según el enfoque definido como: E1, E2, E3, E4 y E5. La tabla 1 muestra la clasificación en grupos de los artículos revisados, de acuerdo con el enfoque de cada investigación.

#### **4. Discusión**

En la revisión realizada es posible identificar que el desarrollo de proyectos mecatrónicos a partir del 2017 está cambiando, debido a la incursión de tecnologías

IOT, computación en la nube, y demás tecnologías de la cuarta revolución industrial. Por lo tanto, los nuevos desafíos de desarrollo de productos mecatrónicos tendrán que abordar la conectividad y manejo de datos integrados a la I4.0. En la figura 1 se presenta la gráfica de la frecuencia acumulada de las investigaciones citadas en este documento desde el 2014 hasta la fecha por enfoque.

Tabla 1 Revisión de investigaciones de desarrollo de productos mecatrónicos.

Enfoques	Descripción	Investigaciones
E1	Reducción de costos en el desarrollo o fabricación de productos mecatrónicos a través de la implementación de tecnología más barata.	[Anuar, 2017]; [Bula, 2018]; [Deng, 2017]; [Gravalos, 2019]; [Grigoriev, 2018]; [Lara, 2017]; [Liu, 2017]; [Martinov, 2018]; [Martinova, 2018]; [Quatrano, 2017]; [Rad, 2017]; [Ramesh, 2020]; [Ruzanov, 2017]; [Saravanakumar, 2018]; [Valencia, 2018]; [Vij, 2019]; [Wasif, 2019]; [Wu, 2017]; [Yao, 2019]; [Yusof, 2015].
E2	Optimización y visualización del diseño mecatrónico (Gestión de la complejidad del producto) para mitigar costos de desarrollo y manufactura e incrementar el desempeño funcional.	[Bobka, 2018]; [Chouinard, 2019]; [Emilia, 2019]; [Gogineni, 2019]; [Li, 2019]; [Martinov, 2019]; [Mcharek, 2018]; [Mohebbi, 2019]; [Moulianitis, 2018]; [Saravanakumar, 2017].
E3	Diseño en conjunto de productos mecatrónicos y su proceso de fabricación.	[Mhenni, 2018]
E4	Proyectos de sistemas mecatrónicos (metodologías, métodos para la optimización de las fases de desarrollo de un producto mecatrónico).	[Chouinard, 2019]; [Lenz, 2018]; [Martinov, 2019]; [Mcharek, 2019]; [Mcharek, 2018]; [Mohebbi, 2019]; [Tamm, 2019]; [Zheng, 2019].
E5	Proyectos de sistemas mecatrónicos con implementación de tecnologías de la I4.0.	[Chan, 2019]; [Emilia, 2019]; [Fati, 2019]; [Gheorghe, 2018]; [Gogineni, 2019]; [Gravalos, 2019]; [Gualtieri, 2020a], [Gualtieri, 2020b]; [Martinov, 2020]; [Menezes, 2019]; [Mhenni, 2018]; [Penas, 2017]; [Qiu, 2020]; [Ye, 2018]; [Židek, 2020].

Fuente: Elaboración Propia.

En total en esta investigación fueron estudiados 50 artículos. En la figura 1 se puede observar una gran inclinación por desarrollar tecnologías más baratas en el desarrollo de proyectos de productos mecatrónicos. Los autores citados en el enfoque E1 buscan la forma de disminuir el precio final en el desarrollo de un

producto mecatrónico a través de la implementación de materiales más baratos, estrategias de control robustas, tecnologías de accionamiento de menor precio y diseño de software libre.

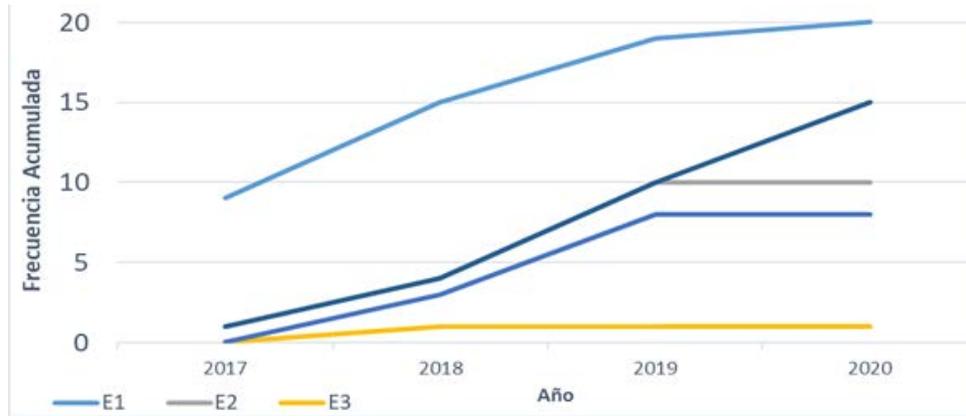


Figura 1 Investigación en el estudio del desarrollo de productos mecatrónicos.

Si se calcula la pendiente de la variación del número de artículos publicados en el año 2017 y 2020, se obtiene la tabla 2.

Tabla 2 Tendencia en investigación de desarrollo de productos mecatrónicos.

Enfoques	2016	2020	Pendiente
E1	9	20	17.75
E2	1	10	9.75
E3	0	1	1
E4	0	8	8
E5	1	15	14.75

En este artículo se utiliza el valor de la pendiente para concluir que los enfoques tendencia en desarrollo de productos mecatrónicos están orientado hacia los enfoques E1, E2 y E5 en la actualidad.

## 5. Conclusiones

Para cumplir con el objetivo del documento se hizo una revisión bibliográfica en el desarrollo de productos mecatrónicos desde el 2017. Los artículos son clasificados según sus objetivos en enfoques de investigación. Con los enfoques

identificados, se hace un análisis del número de citas por año de cada uno, con el propósito de calcular la pendiente de publicaciones entre el 2017 y el 2020. Esta pendiente, se la toma como el indicador de la tendencia investigativa en la actualidad. A través de los análisis y resultados obtenidos se observó que las tendencias investigativas en el área del desarrollo de nuevos productos mecatrónicos están direccionadas a los enfoques:

Reducción de costos en el desarrollo o fabricación de productos mecatrónicos a través de la implementación de tecnología más barata.

Optimización y visualización del diseño mecatrónico (Gestión de la complejidad del producto) para mitigar costos de desarrollo y manufactura e incrementar el desempeño funcional. Proyectos de sistemas mecatrónicos con implementación de tecnologías de la I4.0.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Ahmadinejad A., Afshar A., (2011). Complexity management in mechatronic product development based on structural criteria. *Mechatronics (ICM)*, 2011 IEEE 7–12.
- [2] Anuar A., Sahari K. S. M., Yue E. C., (2017). Development of a low cost upper limb motion tracking system with real-time visual output. *IRIS 2016 - 2016 IEEE 4th Int. Symp. Robot. Intell. Sensors Empower. Robot. with Smart Sensors* 146–150. <https://doi.org/10.1109/IRIS.2016.8066081>.
- [3] Attaran M., (2017). Additive Manufacturing: The Most Promising Technology to Alter the Supply Chain and Logistics. *J. Serv. Sci. Manag.* 10. <https://doi.org/10.4236/jssm.2017.103017>.
- [4] Fotso A. B., Wasgint R., Rettberg A., (2012). State of the art for mechatronic design concepts. *Proc. 2012 8th IEEE/ASME Int. Conf. Mechatron. Embed. Syst. Appl. MESA 2012* 232–240. <https://doi.org/10.1109/MESA.2012.6275567>.
- [5] Barbalho S. C. M., Monteiro de Carvalho M., Tavares P. M., Llanos C. H., Leite G. A., (2019). Exploring the Relation Among Product Complexity, Team Seniority, and Project Performance as a Path for Planning New Product

- Development Projects: A Predictive Model Applying the System Dynamics Theory. *IEEE Trans. Eng. Manag.* 1–14. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2936502>.
- [6] Bobka P., Heyn J., Henningson J., Römer M., Engbers T., Dietrich F., Dröder K., (2018). Development of An Automated Assembly Process Supported With An Artificial Neural Network. *J. Mach. Eng.* 18, 28–41.
- [7] Bula I., Hoxha V., Hajrizi E., (2018). Robot from Mechatronics Scrap -Beggar Robot. *IFAC-PapersOnLine* 51, 216–219. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.289>.
- [8] Chan R. W. K., Lin Y. S., Tagawa H., (2019). A smart mechatronic base isolation system using earthquake early warning. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 119, 299–307. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.019>.
- [9] Chen C. H., Ling S. F., Chen W., (2003). Project scheduling for collaborative product development using DSM. *Int. J. Proj. Manag.* 21, 291–299. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(02\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(02)00023-6).
- [10] Chouinard U., Achiche S., Baron L., (2019). Integrating negative dependencies assessment during mechatronics conceptual design using fuzzy logic and quantitative graph theory. *Mechatronics* 59, 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.03.009>.
- [11] Deng C., Guo R. feng, Xu X., Zhong R. Y., Yin Z., (2017). A new high-performance open CNC system and its energy-aware scheduling algorithm. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 93, 1513–1525. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0593-6>.
- [12] Emilia G. D., Gaspari A., Natale E., (2019). Mechatronics Applications of Measurements for Smart Manufacturing in an Industry. *IEEE Instrum. Meas. Mag.* 22, 35–43.
- [13] Fati S. M., Al-Nabhani S., Muneer A., (2019). Automated library system using SMS based pick and place robot. *Int. J. Comput. Digit. Syst.* 8, 535–544. <https://doi.org/10.12785/ijcads/080601>.
- [14] Gheorghe G., (2018). Original Concepts and Achievements for Designing of Concepts and Achievements for Designing of Smart Mechatronics, Cyber-

- MixMechatronics Laboratories in the Industry, Designing Smart Cyber-MixMechatronics Laboratories. *IFAC-PapersOnLine* 51, 598–603. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.11.219>.
- [15] Gao W., Zhang C., Hu T., Ye Y., (2019). An intelligent CNC controller using cloud knowledge base 213–223.
- [16] Gogineni S. K., Riedelsheimer T., Stark R., (2019). Systematic development methodology for customizable IoT devices. *Procedia CIRP* 84, 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.287>.
- [17] Gravalos I., Ziakas N., Loutridis S., Gialamas T., (2019). A mechatronic system for automated topping and suckering of tobacco plants. *Comput. Electron. Agric.* 166, 104986. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104986>.
- [18] Grigoriev S. N., Martinov G. M., (2018). An approach to creation of terminal clients in CNC system. *RPC 2018 - Proc. 3rd Russ. Conf. Comput. Technol. Appl.* 1–4. <https://doi.org/10.1109/RPC.2018.8482153>.
- [19] Gualtieri L., Palomba I., Wehrle E. J., Vidoni R., (2020a). The Opportunities and Challenges of SME Manufacturing Automation: Safety and Ergonomics in Human--Robot Collaboration, in: Matt D. T., Modrák V., Zsifkovits H. (Eds.), *Industry 4.0 for SMEs: Challenges, Opportunities and Requirements*. Springer International Publishing, Cham, pp. 105–144. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-25425-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-25425-4_4).
- [20] Gualtieri L., Rojas R. A., Ruiz Garcia M. A., Rauch E., Vidoni R., (2020b). Implementation of a Laboratory Case Study for Intuitive Collaboration Between Man and Machine in SME Assembly, in: Matt D. T., Modrák V., Zsifkovits H. (Eds.), *Industry 4.0 for SMEs: Challenges, Opportunities and Requirements*. Springer International Publishing, Cham, pp. 335–382. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-25425-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-25425-4_12).
- [21] Hehenberger P., (2014). Perspectives on hierarchical modeling in mechatronic design. *Adv. Eng. Informatics* 28, 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.06.005>.
- [22] Hehenberger P., Poltschak F., Zeman K., Amrhein W., (2010). Hierarchical design models in the mechatronic product development process of

- synchronous machines. *Mechatronics* 20, 864–875. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2010.04.003>
- Lenz J., Wuest T., Westkämper E., (2018). Holistic approach to machine tool data analytics. *J. Manuf. Syst.* 48, 180–191. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.03.003>.
- [23] Jacobs M., Swink M., (2011). Product portfolio architectural complexity and operational performance: Incorporating the roles of learning and fixed assets. *J. Oper. Manag.* -J OPER Manag 29, 677–691. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2011.03.002>.
- [24] Lara Padilla H., Sánchez X. S., Paucar T. A., (2017). Design and evaluation of a low-cost mechatronic system to study upper and lower limbs biomechanics. *GHTC 2017 - IEEE Glob. Humanit. Technol. Conf. Proc. 2017-Janua*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/GHTC.2017.8239307>.
- [25] Li Q., Zhang H. H., (2019). Model reduction of a real time multidisciplinary mechatronic system. *Proc. 2019 20th Int. Conf. Res. Educ. Mechatronics, REM 2019* 5, 1–5. <https://doi.org/10.1109/REM.2019.8744102>
- [26] Liu X. F., Shahriar M. R., Al Sunny S. M. N., Leu M. C., Hu L., (2017). Cyber-physical manufacturing cloud: Architecture, virtualization, communication, and testbed. *J. Manuf. Syst.* 43, 352–364. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.04.004>.
- [27] Martinov G. M., Al Khoury A., Issa A., (2018). An approach of developing low cost ARM based CNC systems by controlling CAN drives. *MATEC Web Conf.* 224. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401020>.
- [28] Martinov G. M., Ljubimov A. B., Martinova L. I., (2020). From classic CNC systems to cloud-based technology and back. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 63, 101927. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101927>.
- [29] Martinova L. I., Fokin N. N., (2018). An approach to creation of a unified system of programming CNC machines in the dialog mode. *MATEC Web Conf.* 224. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401101>.
- [30] Mcharek M., Azib T., Hammadi M., Choley J. Y., Larouci C., (2018). Knowledge sharing for mechatronic systems design and optimization. *IFAC-PapersOnLine* 51, 1365–1370. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.338>.

- [31] Martinov G. M., Nikishechkin P. A., Grigoriev A. S., Chervonnova N. Y., (2019). Organizing Interaction of Basic Components in the CNC System AxiOMA Control for Integrating New Technologies and Solutions. *Autom. Remote Control* 80, 584–591. <https://doi.org/10.1134/S0005117919030159>.
- [32] Mcharek M., Hammadi M., Azib T., Larouci C., Choley J. Y., (2019). Collaborative design process and product knowledge methodology for mechatronic systems. *Comput. Ind.* 105, 213–228. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.12.008>.
- [33] Menezes B. C., Kelly J. D., Leal A.G., (2019). ScienceDirect and Design of Industry Opportunities in Manufacturing, Identification and Design of Industry Opportunities in Manufacturing, Examples from Mature Industries to Level Sy. *IFAC Pap.* 52, 2494–2500. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.581>.
- [34] Meysam Mousavi S., Tavakkoli Moghaddam R., Vahdani B., Hashemi H., Sanjari M. J., (2013). A new support vector model-based imperialist competitive algorithm for time estimation in new product development projects. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 29, 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2012.04.006>
- [35] Mhenni F., Hehenberger P., Penas O., Hammadi M., Choley J. Y., (2018). Systems Engineering Approach for the Conjoint Design of Mechatronic Products and Their Manufacturing Systems. *IEEE Comput. Soc.*
- [36] Mohebbi A., Achiche S., Baron L., (2019). Integrated and concurrent detailed design of a mechatronic quadrotor system using a fuzzy-based particle swarm optimization. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 82, 192–206. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.03.025>.
- [37] Moulianitis V. C., Zachiotis G. A., Aspragathos N. A., (2018). A new index based on mechatronics abilities for the conceptual design evaluation. *Mechatronics* 49, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.11.011>
- [38] Penas O., Plateaux R., Patalano S., Hammadi M., (2017). Multi-scale approach from mechatronic to Cyber-Physical Systems for the design of manufacturing systems. *Comput. Ind.* 86, 52–69. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.12.001>.

- [39] Qiu L., Lin X., Wang Y., Yuan S., Shi W., (2020). A mechatronic smart skin of flight vehicle structures for impact monitoring of light weight and low-power consumption. *Mech. Syst. Signal Process.* 144, 106829. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106829>.
- [40] Quatrano A., De Simone M. C., Rivera, Z. B., Guida D., (2017). Development and implementation of a control system for a retrofitted CNC machine by using Arduino. *FME Trans.* 45, 565–571. <https://doi.org/10.5937/fmet1704565Q>.
- [41] Rad C. R., Hancu O., (2017). An improved nonlinear modelling and identification methodology of a servo-pneumatic actuating system with complex internal design for high-accuracy motion control applications. *Simul. Model. Pract. Theory* 75, 29–47. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2017.03.008>.
- [42] Ramesh K., Prajwal K. T., Roopini C., Gowda M., Gupta V., (2020). Design and Development of an Agri-bot for Automatic Seeding and Watering Applications. 2nd Int. Conf. Innov. Mech. Ind. Appl. ICIMIA 2020 - Conf. Proc. 686–691. <https://doi.org/10.1109/ICIMIA48430.2020.9074856>.
- [43] Ruzanov, N. V., Bolotov M. A., Pechenin V. A., Pronichev N. D., Stepanova E. R., (2017). The Method of Improving the Accuracy of Mechatronic Systems for Complex Geometry Measurements. *Procedia Eng.* 176, 529–539. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.352>.
- [44] Saravanakumar D., Mohan B., Muthuramalingam T., (2017). A review on recent research trends in servo pneumatic positioning systems. *Precis. Eng.* 49, 481–492. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.01.014>.
- [45] Saravanakumar D., Mohan B., Muthuramalingam T., Sakthivel G., (2018). Performance evaluation of interconnected pneumatic cylinders positioning system. *Sensors Actuators, A Phys.* 274, 155–164. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.03.025>.
- [46] Tamm C., Perfetto S., Tamm C., Perfetto S., Tamm C., Perfetto S., (2019). Design and Optimization of Mechatronic Systems Using a Holistic and Parametric Simulation Approach. *IFAC Pap.* 52, 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.686>.

- [47] Stankovski S., Ostoji G., Zhang X., Baranovski I., Horvat S., (2019). Mechatronics, Identification Tehnology, Industry 4. 0 and Education 20–22. <https://doi.org/10.1109/INFOTEH.2019.8717775>.
- [48] Tantawi K.H., Fidan I., Tantawy A., (2019). Status of Smart Manufacturing in the United States. 2019 IEEE 9th Annu. Comput. Commun. Work. Conf. 281–283. <https://doi.org/10.1109/CCWC.2019.8666589>.
- [49] Valencia F., Ortiz D., Ojeda D., (2018). Design and testing of low-cost knee prosthesis. 2017 IEEE 2nd Ecuador Tech. Chapters Meet. ETCM 2017 2017-Janua, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ETCM.2017.8247548>.
- [50] Vij, A., Vijendra, S., Bajaj, S., Bassi, A., Sharma A., (2019). IoT and Machine Learning Approaches for Automation of Farm IoT and Machine Approaches Automation of Farm on Computational Intelligence for IoT and Machine Learning Approaches for Automation of Farm Irrigation System. *Procedia Comput. Sci.* 167, 1250–1257. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.440>.
- [51] Wasif M., Siddique Q. M., Sakib S., Rameez T.M., (2019). Design of Mini CNC using Arduino uno 3882–3884.
- [52] Weber C., (2005). Complexity as Discussed in Other Fields. *Int. Conf. Eng. Des. Iced 05 Melb.* 1–12.
- [53] Wu J., Li D., Wang S., (2017). The design and experimental research of an open architecture soft-CNC system based on RTX and an IPC. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 89, 1387–1399. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9197-9>.
- [54] Yao Y., Liu M., Du J., Zhou L., (2019). Design of a machine tool control system for function reconfiguration and reuse in network environment. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 56, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.09.005>.
- [55] Ye Y., Hu T., Zhang C., Luo W., (2018). Design and development of a CNC machining process knowledge base using cloud technology. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94, 3413–3425. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9338-1>.
- [56] Yusof Y., Latif K., (2015). New interpretation module for open architecture control based CNC systems. *Procedia CIRP* 26, 729–734. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.051>.

- [57] Zheng C., Xiansheng Q., Eynard B., Jing L., Jing B., Yicha Z., Gomes S., (2019). Interface model-based configuration design of mechatronic systems for industrial manufacturing applications. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 59, 373–384.
- [58] Židek K., Modrák V., Pitel J., Šoltysová Z., (2020). The Digitization of Quality Control Operations with Cloud Platform Computing Technologies, in: Matt, D.T., Modrák, V., Zsifkovits, H. (Eds.), *Industry 4.0 for SMEs: Challenges, Opportunities and Requirements*. Springer International Publishing, Cham, pp. 305–334. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-25425-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-25425-4_11).