

## [221025] Manual de diseño y ejecución de dos procesos de manufactura, haciendo uso de la integración entre tres módulos del CP Factory y el centro de mecanizado CNC.

Erik Jussed Lozano Coronado <sup>a,c</sup>, Hashly Carolina Rojas Arevalo <sup>a,c</sup>, Santiago Sierra Diaz <sup>a,c</sup>

Christian Ricardo Zea Forero <sup>b,c</sup>

<sup>a</sup>Estudiante de Ingeniería Industrial

<sup>b</sup>Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

<sup>c</sup>Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

---

### Resumen

Industry 4.0 has generated great changes in business and educational requirements. For this reason, the need to have personnel trained in new technologies and the need for universities to train future professionals competent in innovative technologies to achieve an approach to this industry must be considered. The Pontificia Universidad Javeriana purchased a CP Factory to simulate and control production and manufacturing processes. After the purchase, this equipment was installed and integrated with other equipment that the University already had. However, there is no documentation that allows the development of joint manufacturing processes between the CP Factory and the computerized numerical control (CNC) machining center.

For this reason, a manual for the design and execution of two manufacturing processes was created, using the integration between three modules of the CP Factory and the CNC machining center, going through all the development phases of the manufacturing process of two products. The process of creating the manual was carried out through different stages. Initially, it was necessary to identify the machines involved in the process to know the processes of its operation, for this purpose, flow diagrams of initialization of the equipment and characterization sheets for each equipment were made. Then, the manufacturing processes of two products were defined to make use of and validate the integration between the selected equipment considering the technological advances brought by industry 4.0. In this section, process flow diagrams were made, the raw material for the products was chosen by scoring in a weighting matrix and CAD tools were used for the 3D models of the products to be manufactured. Following this, the characteristics of a MES system that controls manufacturing were identified. In this section, the configuration of the MES4 software that communicates with the PLC that allows the execution of the processes and implement new interactions between the equipment, resulted in the creation of a new interaction that allowed the possibility of machining a part on both sides within the same manufacturing process. Afterwards, the CNC code was carried out and several machining tests of the products using Emco Fanuc31 software.

Finally, the manual was validated through the implementation of the manufacturing processes resulting in two products shown in image 1 and 2 respectively.



Ilustración 1. Prototipo del Proceso de Manufactura 1



Ilustración 2. Prototipo del Proceso de Manufactura 2

The validation process was performed by executing each of the manufacturing processes on 10 occasions. For the first manufacturing process, the result was that the process was completed satisfactorily in 20% of the executions, while for the second process, 10% of the 10 tests were completed satisfactorily. It can be concluded that the processes have instability added to the limitations found in the automation caused by the restrictions of the machines.

## 1. Justificación y planteamiento del problema

En los últimos años, la Pontificia Universidad Javeriana realizó una importante inversión a nivel tecnológico en recursos para la educación con la finalidad de realizar un acercamiento a la industria 4.0. (I.4.0). Este tipo de industrialización tiene como objetivo la implementación de nuevas tecnologías en entornos que permitan la automatización de procesos de producción, donde se presenten interacciones entre máquinas y se reduzca la participación humana (MinTic, 2019), haciendo uso de elementos como el internet, interconexión y flexibilidad, entre otras herramientas que mejoran el rendimiento de las compañías.

Es importante mencionar que, a nivel organizacional, la industria 4.0 representa una oportunidad con gran potencial para incrementar la productividad en aquellas empresas que tengan la capacidad de aplicar tecnologías, infraestructura y talento humano capacitado. En un estudio de America Society for Quality (ASQ) se obtuvo que la implementación de I.4.0 en los procesos de manufactura permite aumentar el rendimiento dentro de las compañías. Adicionalmente, algunas organizaciones que han puesto en práctica la manufactura inteligente declararon que han experimentado incrementos en eficiencia con un 49% menos de productos defectuosos y un 45% de aumento en la satisfacción de sus clientes (Acevedo Amaya et al., 2020) A nivel académico, se realizó una revisión de los laboratorios que cuentan con herramientas de automatización. Se encontraron algunas instituciones universitarias con centros tecnológicos de diferentes niveles que brindan un acercamiento a la automatización de procesos. A continuación, se presenta la tabla 1 en donde se consignó la información consultada.

Universidad	Laboratorio	Fuente	Enlace
Universidad ECCI	Laboratorio de Mecanizado CNC	(Laboratorio de Mecanizado CNC - Universidad ECCI, n.d.)	<a href="#">Laboratorio de Mecanizado CNC - Universidad ECCI</a>
Universidad Central	Laboratorio de Desarrollo Tecnológico	(Laboratorio de Desarrollo Tecnológico   Universidad Central, n.d.)	<a href="https://www.ucentral.edu.co/ficb/laboratorio-desarrollo-tecnologico">https://www.ucentral.edu.co/ficb/laboratorio-desarrollo-tecnologico</a>
Universidad de los Andes	Laboratorio AIA (Ambiente integrado de aprendizaje)	(LAB AIA   Uniandes, n.d.)	<a href="https://industrial.uniandes.edu.co/es/laboratorio-aia">https://industrial.uniandes.edu.co/es/laboratorio-aia</a>
Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD	Laboratorio CIM (Manufactura integrada por Computador)	(Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería   Componente Práctico   Escenarios Remotos - Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD - Educación Virtual, n.d.)	<a href="https://estudios.unad.edu.co/componente-practico-ebti/escenarios-remotos-ebti">https://estudios.unad.edu.co/componente-practico-ebti/escenarios-remotos-ebti</a>
Escuela de Ingenieros Julio Garvito	Laboratorio de Manufactura	(Laboratorio de Manufactura - Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garvito, n.d.)	<a href="https://www.escuelaing.edu.co/es/campus/laboratorio-de-manufactura/">https://www.escuelaing.edu.co/es/campus/laboratorio-de-manufactura/</a>
SENA	FACT (Centro de Entrenamiento Autorizado y Certificado por Festo)	(Festo Entrega Certificación Internacional a Un Ambiente Del SENA Para Automatización y Mecatrónica, En Antioquia, n.d.)	<a href="https://www.sena.edu.co/es-co/Noticias/Paginas/noticia.aspx?IdNoticia=3076">https://www.sena.edu.co/es-co/Noticias/Paginas/noticia.aspx?IdNoticia=3076</a>

Tabla 1. Resumen de laboratorios en Universidades de Colombia. Fuente: Elaboración propia.

A un nivel más avanzado en el desarrollo tecnológico se encuentra FESTO quien es el “proveedor líder internacional en tecnología de automatización y suministrador de equipos y soluciones para la formación industrial (Grupo Festo - Compañía - Festo Didactic, n.d.) ha llevado a cabo 16 proyectos tecnológicos enfocados en el desarrollo de centros de manufactura flexible (FMS) y centros integrados de manufactura (CIM). Ambos centros son sistemas que constan de máquinas de control numérico computarizado (CNC) cargadas y descargadas por robots industriales. Igualmente, estas están interconectadas por

sistemas automatizados de recolección de materiales y labores de almacenamiento que son controlados digitalmente, siendo capaces de procesar gran variedad de familias de productos (Mahmood et al., 2017).

Los proyectos realizados por FESTO se desarrollaron bajo el principio de la industria 4.0 en diferentes Universidades del mundo, donde tres se llevaron a cabo en Latinoamérica. El primero fue desarrollado en la Universidad del Trabajo del Uruguay donde se creó el Centro de Excelencia para la Automatización Industrial y Mecatrónica (Festo, n.d.). El segundo, se realizó en la Universidad Don Bosco de El Salvador donde se desarrolló un sistema de fabricación integrado por computadora que proporciona la planificación de la producción e ingeniería detrás de los procesos de manufactura industriales, por medio de un sistema de manufactura flexible (FMS) (*Proyectos Tecnológicos / Festo CO*, n.d.). El tercero se realizó en la Pontificia Universidad Javeriana donde se realizó la adquisición de una fábrica ciber física, CP Factory.

Para este proyecto, la Pontificia Universidad Javeriana realizó la ampliación del Centro Integrado de Manufactura (CIM) por medio de la adquisición de un CP Factory, esta es una fábrica ciber física que cuenta con varios módulos o estaciones de trabajo que incluyen un almacén de materia prima/producto terminado, una banda transportadora para el flujo de material, robots manipuladores y una estación de control de calidad por visión artificial. Este centro de tecnología de I.4.0 busca simular la completa digitalización de procesos empresariales a través de la integración de tecnologías de procesamiento de datos, inteligencia artificial y sensores. Además, el CP Factory permite programar, controlar y simular físicamente actividades asociadas a las cadenas de abastecimiento y procesos industriales (Centro Integrado de Manufactura / Integrated Manufacturing Center, n.d.).

Posterior a la adquisición de los nuevos equipos del CIM, la Universidad inició un trabajo conjunto desde el Centro Tecnológico de Automatización Industrial (CTAI) con FESTO. Este proveedor se encargó de realizar la instalación y las configuraciones necesarias por medio de software especializado para el proceso de integración entre la tecnología que poseía el CTAI, específicamente el torno de control automático y la estación de mecanizado, que trabajarán en conjunto con los nuevos módulos adquiridos en el CP Factory. Adicionalmente, el equipo de Festo fue el encargado de brindar capacitaciones dirigidas al personal responsable del CTAI, algunos profesores del área de tecnología y un pequeño grupo de estudiantes interesados. Sin embargo, según lo expresado por algunos asistentes a las capacitaciones, estuvieron de acuerdo en que los temas a tratar fueron explicados superficialmente y no se logró estudiar a detalle el manejo del CIM, pues su contenido fue suministrado en corto tiempo lo que provocó que no se lograra profundizar en algunos temas cruciales para la operación de los equipos (D. Aragonéz, comunicación personal, 7 de febrero 2022).

Las capacitaciones realizadas no quedaron documentadas para la utilización por parte de la Universidad, es decir, que las únicas personas que pueden hacer uso de los equipos adquiridos es el personal que asistió al curso brindado por FESTO o aquellas personas que trabajan en el laboratorio diariamente. Como consecuencia de esto, la capacidad de desarrollar aplicaciones, ejecutar programas y desarrollar procesos de manufactura es limitada. Por otro lado, si alguien que no fue capacitado tiene la necesidad de usar los equipos tiene dos alternativas: 1) Solicitar el apoyo de las personas que asistieron a la capacitación o 2) Consultar los manuales de funcionamiento, que a pesar de tratar temas en detalle de cada equipo no tiene el alcance adecuado para hacer uso integral de los equipos pertenecientes al CIM.

Teniendo en cuenta lo anterior, se han identificados dos problemas: 1) No existen recursos que documenten el funcionamiento de los equipos de manera integral en un momento determinado y 2) Si las personas que poseen parcialmente este conocimiento dejan de trabajar en la Universidad, su experiencia y conocimiento del funcionamiento de los equipos del laboratorio se perderían y no estaría disponible al interior de la institución, lo cual impide la transmisión de la información para futuros profesores y estudiantes de la universidad.

Por este motivo, el presente proyecto plantea el desarrollo de un manual de diseño y ejecución de dos procesos de manufactura, que permita identificar los pasos que posibilitan poner en funcionamiento el desarrollo de dos productos por medio de la utilización de la integración entre los siguientes equipos:

1. CNC milling machine Emco Concept Mill 450 (Centro de mecanizado de control numérico computarizado)
2. AS/RS for boxes (Almacén de materia prima / producto terminado)
3. Mobil robot Robotino for boxes (Vehículo guiado automáticamente / Robot manipulador)
4. MR buffer (Banda transportadora con brazo robótico)

El manual facilitará a los estudiantes y profesores el correcto uso de los equipos del laboratorio, ya que tendrán acceso a un recurso donde se documentan las actividades a realizar en los distintos módulos que se contemplan en este trabajo de grado, dando así pie a la práctica autónoma e independiente para las diferentes carreras de la facultad de Ingeniería o afines interesadas en que sus estudiantes tengan un acercamiento a un ambiente industrial automatizado y robotizado.



Ilustración 3. Mobil robot  
Robotino for boxes. Fuente:  
(Festo Didactic, 2019a)



Ilustración 4. MR buffer & CNC milling  
machine Emco Concept Mill 450. Fuente:  
(Festo Didactic, 2019b)



Ilustración 5. AS/RS  
for boxes. Fuente:  
(Didactic, 2019)

## 2. Antecedentes

Teniendo en cuenta los avances y desarrollos que ha presentado la industria 4.0 en los últimos años, se realizó una revisión de la literatura a partir de la consulta de documentos que presentan propuestas, metodologías o estudios de casos relacionados con el acercamiento a la I.4.0 en la Educación Superior. Los artículos más relevantes para nuestro proyecto se dividieron en dos categorías: Educación en la industria 4.0 e Instalaciones de aprendizaje

### 2.1. Educación en I.4.0

Como consecuencia de las necesidades del mercado, se han generado cambios en los requerimientos educativos de los profesionales, quienes deben estar calificados para interactuar, controlar, mantener y operar las tecnologías requeridas para el desarrollo de la I 4.0.

En los estudios consultados se hace énfasis en el surgimiento del término educación 4.0, la cual se apoya en las Tecnologías de Información y las Comunicaciones (TIC) para mejorar los procesos de conocimiento y transferencia de la información. Se busca implementar un sistema educativo que aplique las nuevas tendencias tecnológicas y emergentes con la finalidad de formar profesionales que sean capaces de aplicar recursos físicos y digitales para brindar soluciones a los desafíos actuales y futuros (Benesova et al., 2018). Además, se estudian algunos riesgos relacionados con la implementación de este nuevo tipo de educación, por ejemplo, en algunos casos de estudio desarrollados en la Ciudad de México se obtuvo que la educación superior se enfrenta a problemas derivados de la falta de adaptación al rápido avance (Miranda et al., 2021).

En Sudáfrica se realizó un estudio para identificar los elementos esenciales para implementar las tecnologías de la enseñanza y el aprendizaje. Los resultados revelaron mejoras notables en la calidad de la educación con la ayuda de tecnologías emergentes propias de la cuarta revolución industrial. Los estándares de calidad en la educación y la sostenibilidad del calendario académico durante el confinamiento por la pandemia son pruebas de que las Universidades están preparadas para implementar la convergencia entre humanos y máquinas en esta nueva era. Finalmente, se concluyó que existe la necesidad de contar con una política nacional que se ocupe de la financiación para cerrar la brecha existente entre la educación del pasado y la educación 4.0 (Moloi & Salawu, 2022)

## 2.2. Instalaciones de aprendizaje

En la educación 4.0 se hace énfasis en que las instituciones de Educación Superior deben incluir instalaciones de aprendizaje, las cuales se definen como ambientes para que los estudiantes puedan tener una experiencia práctica de los conocimientos teóricos en entornos reales o simulados, estos pueden ser un laboratorio, talleres o una fábrica real (Sackey et al., 2020a). A continuación, se presentan algunos estudios relacionados con la implementación de instalaciones de aprendizaje.

### 2.2.1. Laboratorios para el acercamiento a la I.4.0

Un grupo de tres Universidades alemanas coopero para realizar el proyecto ELLI “Excellent Teaching and Learning in Engineering Science” con la finalidad de crear herramientas novedosas para la enseñanza por medio del desarrollo de laboratorios remotos elaborados bajo el concepto de la I.4.0. donde se busca mejorar la educación para estudiantes de ingeniería. Uno de los primeros proyectos consistió en la creación de un laboratorio de testeo de materiales y una celda de doblado de tubos completamente automatizada para realizar pruebas de forma remota, un aspecto típico de la I.4.0. Además, los estudiantes cuentan con lecturas y animaciones que permiten trabajar de forma independiente. Por otro lado, se están desarrollando laboratorios totalmente virtuales que brinden herramientas de apoyo a la enseñanza y la práctica autónoma por parte de los estudiantes (Grodzki et al., 2018).

En el año 2018, en la Universidad Tecnológica de Brno ubicada en Republica Checha, se realizó el desarrollo de un banco de pruebas para la demostración de tecnologías 4.0 en un laboratorio donde se evidencia la interconexión de equipos para un proceso de fabricación flexible. El estudio muestra todas las estructuras de comunicación y control para equipos tales como una fresa de control numérico, impresoras 3D, manipuladores industriales y un robot móvil desarrollado completamente por el equipo del banco de pruebas, así como todo el sistema de localización y navegación. Al finalizar el proyecto se logró que el sistema funcionara plenamente de forma autónoma, sin embargo, se sigue trabajando en la implementación de nuevos equipos al banco de pruebas (Zalud et al., 2019).

A pesar de que algunas Universidades han realizado inversiones para la creación de laboratorios, algunos casos de estudio desarrollados en la Ciudad de México obtuvieron que la educación superior se enfrenta a problemas derivados del rápido avance tecnológico (Miranda et al., 2021). Una investigación desarrollada en Sudáfrica evidencio frustración por parte de las Universidades encuestadas con el rápido cambio tecnológico, que tiende a hacer que las nuevas instalaciones queden obsoletas mucho antes de lo esperado, lo que genera grandes costos para las instituciones. Se debe tener en cuenta que la tecnología avanza de forma permanente y la educación tiene la necesidad de adaptarse (Sackey et al., 2020b).

### 2.2.2. Fábricas de aprendizaje

Algunas Universidades ubicadas en Italia, Finlandia, Noruega y Alemania han realizado proyectos en torno al desarrollo de fábricas de aprendizaje, las cuales son fabricas a pequeña escala enfocadas al estudio de los Cyber-physical systems (CPS) que son la unión de sistemas físicos y computacionales que trabajan en conjunto para ejecutar procesos en tiempo real permitiendo obtener beneficios como predicción de fallas, autonomía y adaptación. Estas instalaciones de aprendizaje se enfocan en el estudio de las características, retos y aplicaciones de los CPS, esto posibilita el desarrollado de conocimiento acerca de la I.4.0 por medio de pruebas de testeo y experiencia práctica. (Lozano & Vijayan, 2020)

En la Universidad Tecnológica de Cracovia en Polonia, se combinaron elementos de robótica, automatización, mecatrónica, informática aplicada, tecnología de medición y diseño de máquinas con la finalidad de que los estudiantes de ingeniería pudieran trabajar con hardware y software utilizados en la industria manufacturera. Adicionalmente, se quiere lograr una valiosa preparación para el trabajo en la producción industrial moderna e industrias relacionadas, mediante la adaptación y transición de las máquinas y herramientas de control numérico computarizado (CNC) de acuerdo con el concepto de I.4.0. (Zębala et al., 2021)

### 2.2.3. Centros integrados de manufactura

En la Universidad del Bosco se desarrolló una propuesta para el análisis de procesos industriales en entornos de manufactura integrada por computadora CIM. Para llevar la propuesta a cabo se realizó el modelado y simulación de una celda de manufactura flexible, por medio de un software especializado que permitió la programación de eventos, actividades, flujos de información y materiales. Se obtuvo como resultado la simulación de procesos avanzados de manufactura que permitían la integración de la robótica para diferentes niveles de automatización. (Cuscatlán et al., 2016)

En la Pontificia Universidad Javeriana en el año 2006 se realizaron dos trabajos de grado relacionados con centros integrados de manufactura. Inicialmente, se realizó la transición del sistema de manufactura flexible (FMS) hacia un sistema de manufactura integrada por computador (CIM), a través de la integración en los procesos de planeación de producción de recursos empresariales (ERP) con el fin de automatizar procesos (Retamoso et al., n.d.). Por otro lado, se desarrolló la implementación, construcción y validación de una estación de control de calidad orientada a la inspección y verificación de piezas mecanizadas, basada en visión artificial y acoplada a un sistema de manufactura integrada por computador. (Gabriel Mauricio Zambrano Rey et al., 2007)

Siendo conscientes del avance y crecimiento de la industria 4.0 en temas relacionados con integración, y que actualmente el CP Factory de la Pontificia Universidad Javeriana cuenta con un sistema de fabricación encargado de controlar únicamente los procesos de producción y manufactura, surgió la necesidad de cubrir aspectos más relevantes en el proceso del CP Factory. Por este motivo, se desarrolló un trabajo de grado cuyo objetivo principal fue realizar la Integración horizontal de un sistema logístico al sistema de producción actual del CP Factory. (Alejandro et al., 2021)

Adicionalmente, un grupo de estudiantes de la Pontificia Universidad Javeriana tuvieron en cuenta que en la actualidad las pequeñas y medianas empresas de manufactura en Colombia se han visto afectadas por el surgimiento de la I.4.0, lo cual ha llevado a que busquen la manera de adaptarse a las necesidades del siglo XXI. Por este motivo, en su trabajo de grado plantearon la idea de encontrar una metodología que permitiera a estas empresas implementar los avances tecnológicos que vienen junto al nuevo desarrollo industrial dentro de su sistema de producción. (Avila et al., 2020)

En el año 2022 se desarrolló un trabajo de grado en la Pontificia Universidad Javeriana donde se desarrollaron Prácticas de laboratorio para el desarrollo de competencias en industria 4.0. Durante este proyecto se realizó un acercamiento al funcionamiento del CP factory y busca crear herramientas que permitan que los estudiantes se familiaricen con el laboratorio de industria 4.0 mientras desarrollan actividades enfocadas a diferentes asignaturas del currículo de ingeniería industrial. (Bohórquez et al., 2022a)

Teniendo en cuenta la revisión literaria se encontró que existen varias Instituciones Universitarias a lo largo del mundo conscientes del avance tecnológico y la necesidad de realizar un acercamiento a la educación 4.0 por medio de metodologías y recursos propios de la cuarta revolución industrial. Sin embargo, se debe tener en cuenta que cada Universidad es un caso específico, con diferentes enfoques y objetivos. Por este motivo se realizará un proyecto sujeto a las tecnologías particulares de la Pontificia Universidad Javeriana, enfocados en la integración del centro de mecanizado CNC y algunos equipos adquiridos con el CP Factory, que permita documentar esta información para el uso de la comunidad educativa.

## **Objetivos**

*Desarrollar un manual que permita diseñar y ejecutar dos procesos de manufactura con diferentes interacciones Automatizadas entre los siguientes equipos: CNC milling machine Emco Concept Mill 450, AS/RS for boxes, Mobil robot Robotino for boxes y MR buffer.*

### **Objetivos específicos**

1. Identificar individualmente las características y configuraciones de los equipos para conocer los procesos operativos de su funcionamiento.
2. Definir los procesos de manufactura de dos productos que permita hacer uso y validar la integración entre los equipos seleccionados.
3. Realizar la programación del MES que controla los equipos para llevar a cabo los procesos de manufactura definidos.
4. Realizar el proceso de diseño y mecanizado CNC de los productos a manufacturar.
5. Validar del manual por medio de la implementación de los procesos de manufactura anteriormente planteados.

## **Desarrollo de la Metodología**

Para conocer los distintos parámetros que hacen parte de la ejecución de los procesos de manufactura, se desarrolló un manual que permite diseñar y ejecutar dos procesos de manufactura con diferentes interacciones entre los equipos. El manual permite al lector conocer todas las etapas que se deben llevar a cabo en los procesos planteados, desarrollando de forma detallada y abarcando las consideraciones para tener en cuenta a la hora de operar los equipos del laboratorio de forma adecuada. El manual se divide en 4 secciones donde inicialmente se introduce y se contextualiza al lector sobre el laboratorio, luego se realiza la inicialización de los equipos donde se especifican las necesidades de cada máquina. En la siguiente etapa se realiza la preparación de la pieza y finalmente se encuentra la ejecución del proceso de manufactura.

**Identificar individualmente las características y configuraciones de los equipos para conocer los procesos operativos de su funcionamiento.**

Para empezar, fue necesario entender el funcionamiento del laboratorio de industria 4.0 desde una visión general del CP factory, hasta abarcar de forma particular cada uno de los aplicativos que componen los módulos a tratar en este trabajo de grado. La metodología utilizada para identificar las características y configuraciones de los equipos se basó en la consulta de diferentes fuentes de información, las cuales tratan temas relacionados con el funcionamiento del laboratorio. Durante este proceso se buscó entender como está conformado el CP factory, identificar cada módulo, comprender los aplicativos y definir un flujo de trabajo que permita la manipulación y uso adecuado de los equipos.

Para iniciar, se recurrió al conocimiento de los docentes y técnicos que han tenido experiencia manejando el CP factory y que han sido partícipes de las capacitaciones brindadas por Festo sobre el uso de los equipos. En un inicio se plantearon reuniones con los técnicos del CTAI, quienes fueron un principal insumo de información para entender el funcionamiento del CP factory. Adicionalmente, se consultaron las “prácticas de laboratorio para desarrollo en competencias 4.0” (Bohórquez et al., 2022) que son un caso aplicado en el mismo laboratorio y fueron utilizadas como fuente de información para entender el funcionamiento general del CP factory.

Asimismo, Existen dos tipos de documentos, los primeros fueron suministrados por Festo y son sobre cada isla de trabajo donde se reúnen varios aplicativos del CP factory, estos manuales integran equipos de otros proveedores, así como las tecnologías propias de Festo. Cuentan con documentos informativos como data sheets y manuales de operación. Estos manuales contienen una amplia información técnica sobre la construcción de cada módulo, algunas partes que los componen y nociones generales de su funcionamiento y configuración. Por lo tanto, para entender más a detalle los módulos a utilizar, se procedió a consultar los manuales de cada isla de trabajo. Se realizó la revisión de los documentos del MR buffer and robot for mill (Festo Didactic, 2019b), Robotino (Festo Didactic, 2019a) y AS/RS for boxes (Didactic, 2019). El segundo tipo de documentos corresponde a los manuales propios de cada aplicativo que son suministrados por el proveedor, estos tratan individualmente las características del equipo. Se realizó la consulta de los documentos de algunos de los aplicativos donde se consultaron los manuales y data sheets del brazo robótico UR10 (Universal Robots, 2016) y del CNC milling machine Emco Concept Mill 450 (States, 2013).

Luego de conocer los equipos y consultar los diferentes recursos disponibles, se realizó la caracterización de los equipos. Para esto se elaboró un formato que contiene un resumen de la información relevante para describir cada equipo. En él se encuentra el nombre del aplicativo, el módulo al cual pertenece, su ID y nombre en el MES-4, el objetivo que cumple, una imagen y una descripción con las características importantes del aplicativo. En el anexo 4 se encuentra la caracterización de los equipos.

Al momento de revisar la documentación, se identificó que los documentos elaborados por Festo pueden llegar a ser muy avanzados y complejos, además de ser extensos y contener información muy técnica sobre las partes que componen el módulo, por lo tanto, esta información no permite cambiar la programación de los equipos. Otro descubrimiento relevante es que se identificó que el manual de la estación MR buffer and robot for mill contiene un error. Este se da ya que el centro de mecanizado CNC utilizado en el manual es diferente al que se encuentra en el CP factory. Esto genera inconsistencias ya que la interfaz y la forma de utilizar los equipos cambia y dificulta su configuración. La falta de información precisa generó que se tuviese que buscar un docente, quien tenía conocimiento de como configurar el centro de mecanizado para que este se comunique con el MES-4.

Por otro lado, al identificar las características del centro de mecanizado se encontró una limitación importante. Se da debido a que este equipo debe contar con una prensa que le permita sujetar firmemente el material a la hora de realizar la operación de fresado. Al revisar la prensa del centro de mecanizado se identificó que esta es mecánica, en tal sentido siempre que se desee mecanizar una pieza, la prensa debe ser ajustada por una persona. Al considerar el proceso de manufactura a realizar, esto representa una restricción, ya que impide que el módulo MR buffer and robot for mill realice procesos de forma automatizada. Para que el proceso se ejecute sin intervención humana, el centro de mecanizado debe ser equipado con una prensa automática que pueda ser accionada directamente desde el PLC controlador del módulo.

Luego de adquirir las nociones básicas para manipular los equipos, se inició una etapa de interacción donde fue necesario utilizar cada módulo del CP factory que interviene en el proceso. En un inicio se debió realizar acompañamiento y supervisión permanente por parte del personal del CTAI. Sin embargo, al dominar y manejar correctamente los equipos, se permitió trabajar de forma independiente. Para iniciar, se identificó como encender los módulos y aplicativos, identificar la función de cada accionador, resolver los errores y ponerlos en modo automático dejándolos listos para trabajar con el MES-4. En este punto se estructuró una secuencia lógica de pasos soportada con una metodología de diagrama de flujo que permite al usuario entender el proceso a realizar con cada uno de los equipos, la finalidad es realizar una correcta inicialización. Como resultado se obtuvieron los diagramas de flujo de proceso que contienen una rutina de encendido según los requerimientos de cada isla de trabajo. El anexo 5 contiene los diagramas de flujo de cada equipo que interviene en el proceso.

El último paso en la identificación de los equipos consistió en reconocer los programas que permiten realizar modificaciones en el proceso. En este punto se identificó que los aplicativos en los cuales se podía interferir serían el brazo robótico UR10 y el centro de mecanizado. Por lo tanto, fue necesario aprender a realizar las configuraciones que daban pie a hacer cambios en el proceso. En este sentido, fue necesario aprender a programar el brazo robótico UR10 y conocer el lenguaje de código para ejecutar programas de mecanizado CNC desde el MES-4. Para aprender a programar y ahondar en el conocimiento de estos equipos se acudió a diferentes docentes especializados que conocían a detalle la forma de programarlos. Con ellos se agendaron sesiones donde se llevaron a cabo reuniones para aprender la información requerida.

Para aprender a programar el brazo robótico UR10 fue necesario solicitar una monitoria con el personal del laboratorio, donde se adquirió información básica sobre los comandos y los pasos para realizar la programación. El brazo robótico UR10 es un robot colaborativo que permite que el usuario interactúe con él a la hora de programarlo. Este cuenta con un software propio de programación llamado Polyscope que es una interfaz gráfica de usuario desarrollada por Universal Robots. Esta interfaz permite al usuario manipular el robot de forma sencilla para crear códigos de programación basados en movimientos por waypoints o puntos de referencia (UniversalRobots, 2018). De esta forma y acompañado de sesiones de practica se adquirió el conocimiento necesario para poder crear programas en el brazo robótico, como resultado se podrán crear nuevas interacciones en el proceso de manufactura.

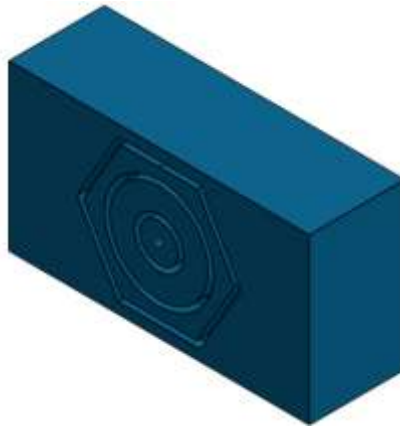
#### **Definir los procesos de manufactura de dos productos que permita hacer uso y validar la integración entre los equipos seleccionados**

Para definir los procesos de manufactura se realizaron diferentes etapas:

Inicialmente, se elaboraron los planos técnicos de dos piezas diferentes bajo las normas ISO con el objetivo de tener un prototipo del producto final. En este caso las piezas fueron diseñadas de manera pedagógica para ejemplificar el proceso, sin embargo, el proceso funciona independientemente del producto que se desee manufacturar. La elección de los productos a manufacturar se realizó teniendo en cuenta los avances y desarrollos que ha presentado la industria 4.0 en los últimos años y su aplicación dentro de varias empresas del sector productivo, textil o manufacturero. Adicionalmente, la industria 4.0 representa una oportunidad con gran potencial para incrementar la productividad en aquellas empresas que tengan la capacidad de aplicar tecnologías, infraestructura y talento humano capacitado, así como para instituciones educativas que pretenden que sus estudiantes se desenvuelvan en estos entornos.



Teniendo en cuenta lo anterior, en la imagen 6 se muestra la proyección isométrica del primer proceso de manufactura.

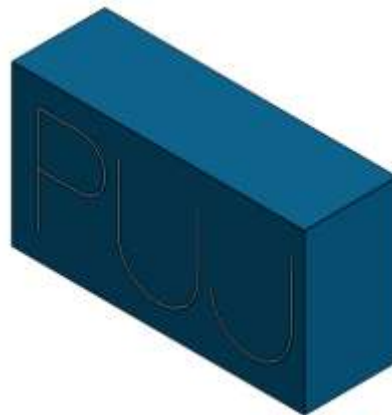


*Ilustración 6. Proyección Isométrica del Proceso de Manufactura 1*

Se desarrolló el proceso de manufactura de este producto en específico ya que se pretende mostrar un producto final con elevada precisión, minimizando la intervención humana dentro del proceso. Adicionalmente, la producción de esta pieza se ajusta a las herramientas y características de los equipos del laboratorio, esto sumado a que se pretendía una interacción completa partiendo desde materia prima hasta producto terminado por medio de interacciones automatizadas entre los equipos, cumpliendo así una de las premisas de la industria 4.0.

Por otro lado, cabe resaltar que la innovación y la diferenciación son pilares fundamentales para que una compañía logre ser competitiva dentro del mercado y es por este motivo que muchas empresas han comenzado a implementar estrategias de personalización de sus productos, las cuales están enfocadas a que los clientes o consumidores tengan una mayor participación en la creación de productos, lo cual genera exclusividad y va de la mano con los avances tecnológicos que se prevén para el futuro, donde se espera que por medio de impresoras 3D u otros tipos de tecnología, sea posible que cada persona pueda diseñar y personalizar productos con total libertad.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la imagen 7 se muestra la proyección isométrica del segundo proceso de manufactura:



*Ilustración 7. Proyección Isométrica del Proceso de Manufactura 2*

Como se mencionó anteriormente, la personalización es un valor agregado que han empezado a implementar algunas empresas y es cada vez más común ver en productos como billeteras, forros de celular, gafas, entre otros, las iniciales del propietario como forma de personalización. Incluso se puede llegar a personalizar la tapa de un celular o dispositivo tecnológico con las iniciales. Por este motivo, se diseñó una pieza con las iniciales de la Pontificia Universidad Javeriana que tiene como objetivo evocar la personalización de productos que se pueden realizar por medio del proceso productivo propuesto a través del mecanizado CNC.

Una vez definidos los productos a manufacturar, era necesario encontrar el material adecuado para la realización de los procesos de manufactura. Se tuvo en cuenta diferentes factores como que el mecanizado de las piezas iba a realizarse en el CNC milling machine Emco Concept Mill 450, que la materia prima debía tener dimensiones de 6 cm x 11 cm para poder entrar en las ranuras de las cajas y que la disponibilidad de herramientas del laboratorio era limitada. Se procedió a buscar la mejor alternativa de material para las piezas. La elección del material se realizó por medio de una matriz ponderada o scoring que evaluaba diferentes factores de tres materiales en específico que cumplían con las características mencionadas anteriormente. Estos materiales fueron:

- Matt – Carving wax
- Empack P.P. (Polipropileno)
- Acero Inoxidable

Por su parte, los factores para tomar la decisión fueron:

- Durabilidad
- Menor desgaste en la herramienta del centro de mecanizado
- Facilidad de corte para adaptar a las dimensiones requeridas
- Proceso de reciclaje

Los resultados del scoring se muestran a continuación:

Scoring de elección de materia prima para realizar los procesos de Manufactura									
	Durabilidad	Pts	Desgaste CNC	Pts	Facilidad de adaptación (Dimensiones)	Pts	Proceso de reciclaje	Puntaje Total	
<b>Referencia</b>	<b>25%</b>		<b>30%</b>		<b>15%</b>		<b>30%</b>		
Matt – Carving wax	Media	3	Bajo	4	Alto	5	Fundido	5	<b>4,2</b>
Empack P.P. (Polipropileno)	Media	3	Bajo	4	Medio	4	Extrusión	4	<b>3,75</b>
Acero Inoxidable	Alta	5	Alto	2	Bajo	2	Fundido	5	<b>3,65</b>

Tabla 2. Scoring para selección de Materia Prima. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados de la matriz, se definió que la mejor alternativa de material para llevar a cabo los procesos de manufactura era usar el material Matt - Carving wax debido a sus características, sumado a que es un material blando que no desgasta las puntas de las herramientas del centro de mecanizado CNC. Adicionalmente, es un material reciclable ya que posterior a su uso se puede fundir y usar en otros procesos, también, es un material que se encuentra dentro del rango de peso que puede manipular el gripper instalado en el brazo robótico UR10.

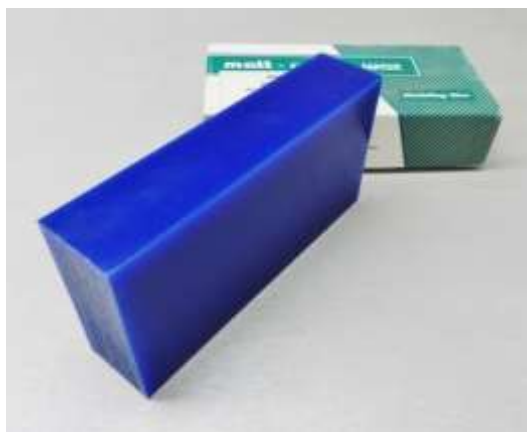


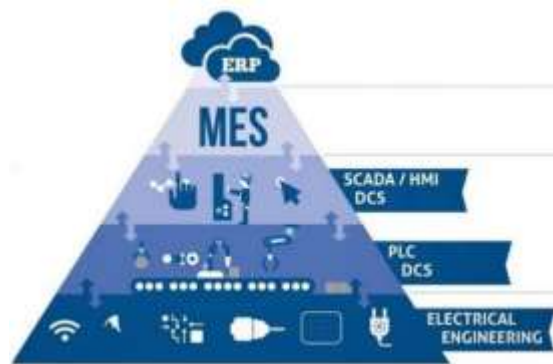
Ilustración 8. Materia Prima escogida: Matt-carving wax.

Finalmente, para llevar a cabo los dos procesos de manufactura, se tuvieron en cuenta las configuraciones realizadas previamente por Festo, quienes fueron los encargados de realizar la instalación y las configuraciones necesarias por medio de software especializado para el proceso de integración entre la tecnología que poseía el CTAI, específicamente el centro de mecanizado, que ahora trabaja en conjunto con los módulos adquiridos en el CP Factory. Teniendo en cuenta las interacciones que quedaron programadas por Festo, para ambos procesos de manufactura utilizamos los mismos equipos que ya han sido mencionados previamente. En términos generales, el primer proceso consiste en un proceso básico en el que un robotino toma la caja con la materia prima del almacén, la transporta hasta la banda transportadora para que el brazo robótico la ponga al interior del centro de mecanizado, donde por medio del código CNC construido se mecanice la materia prima para obtener un producto final que vuelva a ser transportado por el robotino hasta el almacén. Para el segundo proceso de manufactura se quiso agregar una nueva configuración enfocada directamente en el brazo robótico UR10 donde se logró cambiar la configuración original para agregar un giro y que la materia prima se pudiera mecanizar por sus dos caras dentro de la misma orden de producción.

**Realizar la programación del MES que controla los equipos para llevar a cabo los procesos de manufactura definidos.**

El Software MES-4 del CP Factory es un sistema de ejecución de manufactura (MES) que permite la comunicación entre las diferentes estaciones y máquinas que componen el CP Factory, así estos pueden interactuar y trabajar de forma conjunta. El MES-4 del CP factory es una herramienta que permite que los estudiantes se familiaricen con el concepto de MES, conociendo algunas de sus principales características e interactuando con un sistema muy similar a los softwares utilizados a diario por grandes compañías. Actualmente el MES juega un papel importante dentro de la industria 4.0, ya que abarca el nivel de control y planeación de producción, permitiendo integrar varios niveles organizacionales.

El MES es un sistema de control de la producción que permite el flujo de información entre los diferentes niveles de la compañía. Se encarga de monitorear el estado de la planta de producción a través de información suministrada por el sistema SCADA (Supervisory control and data acquisition) que es alimentado por los PLC que contienen y procesan información de los niveles de control y producción, tales como sensores y actuadores de los recursos en planta. Además, Esta información puede ser sustraída al nivel gerencial por medio de la integración con el ERP (Enterprise Resource Planing), esta es una herramienta para la toma de decisiones y planeación a un alto nivel en la compañía. La labor del MES es transformar los planes macro en planes más detallados, para traducir la planeación en termino de meses a planes diarios de producción en planta, con el objetivo de cumplir con las metas establecidas por el ERP. (Shojaeinasab et al., 2022)



*Ilustración 9. Pirámide de automatización. Fuente: (Schubert, n.d.)*

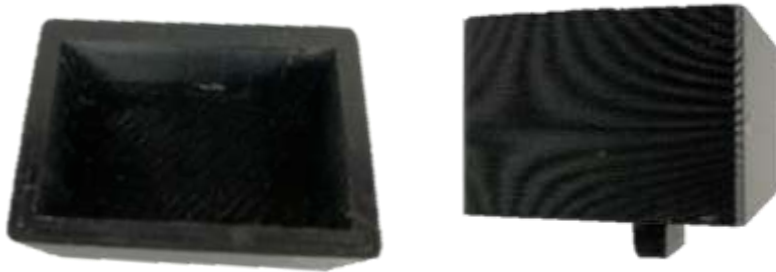
La metodología para este objetivo consistió en la revisión del manual del MES-4 con el propósito de identificar sus principales características y las posibilidades que ofrece este sistema. El manual permitió tener un concepto general del MES-4 que acompañado con tiempo de practica en el laboratorio permitió conocer su forma de uso. Para entender cómo funciona el MES-4 se debe analizar el CP factory como un todo y conocer el flujo de trabajo e información que se da en él. El PLC controlador de los módulos juega un papel fundamental, este es el que se encarga de comunicarse con el MES-4 y ejecutar las operaciones requeridas según las ordenes de producción que se encuentran en el sistema. La comunicación es en doble vía, el PLC envía información al MES-4 y viceversa, permitiendo así que se ejecuten las labores programadas para cada uno de los recursos del CP factory según la información almacenada en el sistema.

Para lanzar una orden de producción desde el MES-4 es necesario identificar la lógica de su funcionamiento. Al crear una orden de producción se debe elegir una parte a manufacturar, cada una de estas partes tiene asociado un plan de trabajo que le indica las operaciones que se deben realizar para completar el proceso y el orden en el cual serán realizados. Cada paso del plan de trabajo corresponde a una operación asignada a cada recurso y configurada según los parámetros del aplicativo. Por lo tanto, al lanzar una orden de producción de una parte, el sistema conoce todas las características de su proceso de producción. Para crear los procesos de manufactura que se abarcan en este trabajo de grado fue necesario aprender a crear piezas, planes de trabajo, operaciones e identificar recursos y parámetros que limitan el proceso de producción según las restricciones de cada módulo que compone el CP factory.

Luego de conocer los fundamentos del MES-4 se procedió a elaborar los planes de trabajo que permitían ejecutar los procesos de manufactura previamente definidos, el plan de trabajo está compuesto por las operaciones y el orden en el cual se deben ejecutar. El primer proceso contaba con una orden de trabajo sencilla con dos operaciones en la que únicamente se realizaba una operación por recurso. En la primera operación el módulo AS/RS for boxes busca una caja con la materia prima solicitada y en la segunda el brazo robótico UR10 carga y descarga el centro de mecanizado donde se ejecuta el proceso de mecanizado.

Sin embargo, a la hora de ejecutar el proceso este no se realizaba, según la teoría de funcionamiento del MES4, el plan de trabajo y la configuración estaba correcta, pero la orden de trabajo no se efectuaba. Luego de varios días de trabajo y de intentar solucionar el problema, se identificó que en el módulo MR buffer and robot for mill, uno de los puertos que conectan al PLC estaba desconectado, lo que ocasionaba fallas en el flujo de información. Este tipo de problemas son usuales en el laboratorio y dificulta la ejecución de los procesos, muchas veces el personal del laboratorio desconocía las razones por las que se generaban fallas en el sistema.

En el segundo proceso fue necesario agregar una nueva operación, esta fue la operación de giro que sería programada en el brazo robótico UR10 y fue introducida por primera vez al sistema del CP factory. Para crear el programa de giro fue necesario analizar el movimiento del brazo robótico para determinar el recorrido que realizaría al momento de rotar la pieza, donde se identificó que no se podía realizar el giro en un único trayecto. Para completar el movimiento fue necesario crear una pieza auxiliar que fue modelada en 3D utilizando el software SolidWorks y construida según las dimensiones de la materia prima y las características del lugar donde sería ubicada al momento de realizar el proceso. Luego se realizó la impresión 3D de la pieza obteniendo como resultado la base que se muestra en la ilustración 10.



*Ilustración 10. Pieza Soporte. Autoría propia*

La base fue diseñada para ser encajada en la estructura del módulo del MR buffer and robot for mill ubicándolo junto al brazo robótico UR10. La pieza es sujeta a presión por la pestaña que posee en la parte inferior mientras que en la parte superior cuenta con un espacio donde se introduce la materia prima. Esta pieza sirve como soporte para el material mientras el brazo robótico cambia el agarre de esta y permite completar el giro satisfactoriamente. Para ejemplificar su función, en la ilustración 10 se observa como el robot ubica la pieza en el soporte, se reacomoda y vuelve a sujetar la pieza desde una posición apropiada para completar el giro. También en el anexo 7 se encuentra un video donde se observa el movimiento completo que realiza el brazo robótico para dar vuelta a la materia prima.



*Ilustración 11. Movimiento giro. Autoría propia*

Luego de crear la nueva operación para la acción de dar el giro, se le asignó el recurso que la realiza y se procedió a elaborar el plan de trabajo que quedo conformado por 4 operaciones. En la primera operación el módulo AS/RS for boxes busca una caja con la materia prima solicitada. En la segunda, el brazo robótico UR10 carga y descarga el centro de mecanizado donde se ejecuta el proceso de mecanizado. En la tercera el brazo robótico UR10 realiza el giro de la pieza. En la cuarta el brazo robótico UR10 vuelve a cargar y descargar el centro de mecanizado donde se realiza el segundo proceso de mecanizado en otra cara de la materia prima. Con esto, se obtuvo como resultado la identificación de las configuraciones y parámetros a tener en cuenta a la hora de realizar un nuevo proceso de manufactura en el MES-4 y el proceso que se debe seguir para construir dos órdenes de trabajo ejecutadas desde el MES-4.

#### **Realizar el proceso de diseño y mecanizado CNC de los productos a manufacturar.**

Los retos para las empresas dedicadas a la producción de bienes son dos: la calidad y la cantidad. La calidad está relacionada con la precisión dimensional, la precisión en la forma y el factor de repetitividad del producto, mientras que la cantidad está relacionada con la debida eliminación de los tiempos muertos durante el proceso productivo que permitan mejorar la productividad. Por este motivo, desde el momento en que surgió la idea de la realización de este trabajo de grado, se tuvo claridad en que se querían abordar por completo los procesos productivos de los productos, empezando desde la etapa de diseño hasta entregar el producto final por medio del mecanizado de materia prima. Es decir que el objetivo siempre fue llevar a cabo todo el proceso de diseño y desarrollo de productos, realizando la transición del modelo CAD (Computer-aided design/ Diseño asistido por ordenador) al modelo CAM (Computer-aided manufacturing/ Fabricación asistida por computador).

Es importante mencionar que SolidWorks, que es un software CAD para modelado, fue la herramienta que permitió los diseños de planos 2D y 3D, ya que en el software CAD es en donde se diseñaron los modelos. Por su parte el CAM que en este caso fue el software Emco Fanuc31, se utilizó para el desarrollo del mecanizado y sirve para controlar las máquinas y herramientas CNC, como el torno o en nuestro caso, el taladro fresador.

Adicionalmente, para realizar esta fabricación asistida se requirió un software que hiciera de puente entre el CAD y el lenguaje de programación de las máquinas CNC. De esta manera se logró que la herramienta realizara las trayectorias para lograr la fabricación de las piezas manufacturadas. Es decir que el CAD/CAM hace referencia a esa unión entre el diseño y la fabricación, mediante la asistencia de un computador.

El proceso de diseño y mecanizado de las piezas a manufacturar en los procesos productivos se dividió en diferentes etapas:

Para empezar, se realizaron en el software SolidWorks los planos técnicos de las piezas a manufacturar. En la metodología correspondiente para el objetivo relacionado con la definición de los procesos de manufactura, se explicaron detalladamente las razones para la elección de las piezas a mecanizar. Para el desarrolló de los planos, se siguieron los parámetros y lineamientos establecidos por las normas ISO y el Sistema Americano de proyección de vistas, como se puede ver en el anexo 2 que corresponde a los planos técnicos de las piezas a mecanizar.

Una vez terminados los planos, el siguiente paso fue la elaboración del código CNC. Para la creación del código, inicialmente se pensó en utilizar una herramienta o software que permitiera la generación automática del código, por este motivo se decidió utilizar Mastercam ya que además de ser un software con el cual se tuvo interacción y aplicación en algunas asignaturas durante la carrera, es uno de los programas CAD/CAM más populares para manufactura en máquinas de control numérico y centros de mecanizado CNC, ya que abarca la programación de fresadoras, centros de mecanizado, tornos, etc, además de ofrecer una gama de módulos para aplicaciones especiales. En Mastercam se configuraron todos los parámetros necesarios como lo son los tipos de herramientas, diámetros de herramientas, dimensiones de pieza, cero de máquina, cero de pieza, entre otros. Posteriormente, se utilizó el simulador CNC que contiene Mastercam, para como su nombre lo indica, simular el proceso de mecanizado de las piezas y fue en ese momento donde tuvimos la primera visual de cómo se vería el proceso de mecanizado de las piezas en el proceso productivo. Una vez terminadas satisfactoriamente las simulaciones, se procedió a descargar el código CNC generado en Mastercam para montarlo en el centro de mecanizado-CNC milling machine Emco Concept Mill 450. Al intentar montar el código CNC generado por Mastercam en el programa Emco Fanuc31, surgieron gran cantidad de errores e inconvenientes debido a la diferencia de parámetros y de configuración inicial que depende en gran medida de la marca y el tipo de máquina que se tenga para mecanizar. En este punto fue necesario recurrir de nuevo a los manuales del equipo y a la ayuda de algunos docentes del departamento de ingeniería industrial de la universidad, para entender el funcionamiento y procesos de inicialización del código en el software Fanuc31. Una vez entendido este proceso, se procedió a realizar la creación del código de forma manual con la ayuda de las coordenadas de los planos técnicos realizados previamente y de los conocimientos previos de asignaturas como máquinas y equipos. Este fue un proceso de pruebas y simulaciones constantes, hasta que se logró la programación del código CNC de los productos propuestos.

Posteriormente, se realizó el proceso de corte de la materia prima Matt – Carving wax, para adaptarla a las dimensiones necesarias para la ejecución de los procesos productivos. Este proceso se realizó con diferentes herramientas que se encuentran ubicadas en la sala de máquinas del edificio de laboratorios de la facultad de ingeniería utilizando herramientas como el taladro fresador.

Seguido de esto, se empezó la interacción directa con el centro de mecanizado-CNC milling machine Emco Concept Mill 450 al contar con los códigos CNC de los productos a manufacturar y la materia prima lista para ser mecanizada. Es importante recalcar que en este punto también fue de vital importancia contar con el manual de funcionamiento del equipo y la ayuda de docentes del departamento de ingeniería industrial y el tiempo dedicado a pruebas de funcionamiento del centro de mecanizado y simulaciones de procesos, ya que con el transcurso del tiempo se logró entender el funcionamiento de la máquina para que el personal del laboratorio nos permitiera utilizar la máquina de forma autónoma ya que en un principio para la utilización del centro de mecanizado siempre se debía contar con la supervisión de un docente.

Finalmente, se realizaron varias pruebas de mecanizado teniendo en cuenta todos los procesos que van detrás de la configuración del centro de mecanizado-CNC milling machine Emco Concept Mill 450 para posteriormente correr las ordenes de producción desde el MES que permiten desarrollar los dos procesos de manufactura, para los cuales el último paso es el mecanizado final de la pieza en el centro de mecanizado. Es importante recalcar que toda la configuración inicial, parámetros de pieza, parámetros de máquina y todo el proceso de mecanizado está explicado detalladamente en el anexo 1 que corresponde al entregable principal de este trabajo de grado que es el Manual de diseño y ejecución de dos procesos de manufactura, haciendo uso de la integración entre tres módulos del CP Factory y el centro de mecanizado CNC.

#### **Realizar la etapa de validación del manual por medio de la implementación de los procesos de manufactura anteriormente planteados**

Para el desarrollo del manual fue indispensable realizar la ejecución de los dos procesos de manufactura en repetidas ocasiones. Las ordenes de trabajo fueron programadas y enviadas desde el software MES-4. Al realizar las órdenes de trabajo de forma repetitiva se encontró inestabilidad en los procesos pues se presentaban interrupciones en su ejecución. A pesar de que los procesos se lograron llevar a cabo satisfactoriamente, también se identificaron fallas recurrentes presentes en las diferentes etapas de estos. Se identificó que los errores se dan cuando el PLC que controla los equipos y se comunica con el MES-4 reconoce que hay fallas de comunicación y por lo tanto detienen el proceso, en la mayoría de las ocasiones se presentan porque los diferentes módulos pierden conexión con el MES.

Por este motivo, se planteó la creación de una tabla de validación de errores que permitió identificar y documentar las fallas más frecuentes en la ejecución de los dos ejercicios propuestos. En esta tabla se documentaron 10 lanzamientos de ordenes de producción para cada uno de los procesos. Se documentaron los resultados para las 20 pruebas teniendo en cuenta el componente que genera el error y una breve descripción de este. La tabla completa se muestra en el anexo 6.

Se realizó la validación para el primer proceso de manufactura donde se obtuvo como resultado que se completó el proceso satisfactoriamente el 20% de las ejecuciones. Al tener un porcentaje de errores tan alto se procedió utilizar la herramienta de Diagramas de Pareto para obtener información significativa sobre los errores más frecuentes y entender los causales de

los fallos durante el proceso. Se revisaron los errores que se obtuvieron en la tabla de validación de errores y se clasificaron en 5 diferentes resultados con el respectivo número de veces que ocurrió como se muestra en la tabla 3.

Resultado	Error	# Veces
A	Ruta del robotino bloqueada	1
B	La caja no ingresa al MR buffer and robot for mill	5
C	La caja sale del AS/RS for boxes y vuelve a ingresar	1
D	El brazo robótico UR10 choca con la prensa	1
E	No hay error	2

Tabla 3. Errores proceso 1. Autoría propia

Luego se realizó el diagrama de Pareto donde se obtuvo que los resultados más repetidos son las fallas en el robotino específicamente al momento de ingresar la caja a la isla MR buffer and robot for mill donde la banda transportadora del robotino no se activaba y por lo tanto la caja no ingresaba a la isla, con una frecuencia relativa del 50%. El siguiente resultado es que el proceso se ejecute satisfactoriamente con una frecuencia relativa del 20%.

	Resultado	# Errores	% Relativa	% Acumulado	Peso acumulado	Corte
1	B	5	50%	50%	0,20	30
2	E	2	20%	70%	0,40	10
3	A	1	10%	80%	0,60	40
4	C	1	10%	90%	0,80	70
5	D	1	10%	100%	1,00	10
		10				

Tabla 4. Información diagrama de Pareto – Proceso 2. autoría propia

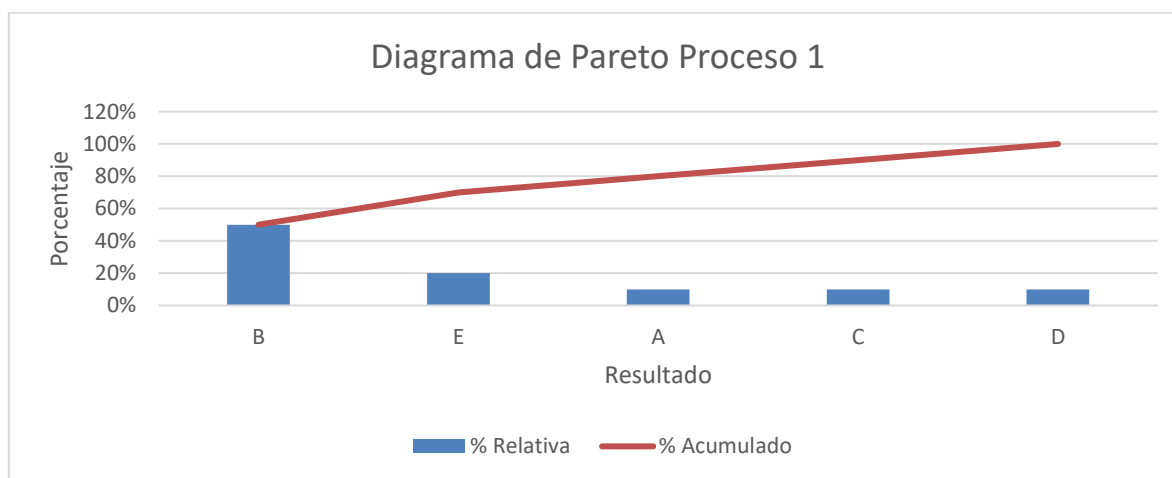


Gráfico 1. Diagrama de Pareto - Proceso 1. Autoría propia.

Con este resultado se determina que el robotino es una de las principales causales de las fallas en la ejecución del proceso de manufactura. Al identificar que este paso dentro del proceso es el que genera más problemas se realizó un análisis para determinar las razones por las cuales se presenta obteniendo las siguientes conclusiones

1. Se identificó que cada robotino cuenta con un sensor emisor y un sensor receptor, cuando el sensor recibe una señal, este cambia de color amarillo a color verde. Sin embargo, cuando el robotino debe dejar la caja en la estación MR buffer, este sensor no se activa por lo que la caja no ingresa a la isla. Seguido de esto aparece una alarma y la orden de trabajo es cancelada, lo que significa que este sensor es el que está generando problemas en el proceso. Cabe resaltar que la calibración de los sensores deben ser realizada por Festo y sobrepasa los límites de este trabajo de grado. En el Anexo 8 se encuentra la información del error.
2. Se determinó que los sensores del MR buffer and robot for mill están inclinados, se realizó la prueba con una herramienta de nivel donde se determinó que posiblemente los sensores no están alineados. Por lo tanto, se dificulta el correcto intercambio de información por la diferencia en el nivel de altura que se puede dar entre los sensores del robotino y los sensores de la isla por la inclinación. Se debe tener en cuenta que los módulos deben estar ubicados en una misma posición, pues cuando se mueven si no se tienen los cuidados requeridos se pueden generar daños en los sensores de la estación, esto genera es un factor crítico ya que si se desea ajustar la prensa del CNC se debe mover el módulo del MR buffer lo que puede estar ocasionando las fallas en los sensores. En el anexo 9 puede encontrar el problema

- Se intento realizar las pruebas con el robotino 15 sin embargo, este robotino está presentando fallas dentro del laboratorio por que se decide evitar su uso.

Luego de conocer los resultados para el proceso 1 se decidió realizar la validación del proceso 2 sin usar los robotinos en el proceso ya que se determinó que este era uno de las principales causales de fallas en el proceso por las razones especificadas. Para el segundo proceso se reemplazó el robotino y las cajas eran transportadas por una persona, esto con la finalidad de determinar si existe otro problema recurrente. De las 10 pruebas ejecutadas se completaron satisfactoriamente el 10%, Se revisaron los errores que se obtuvieron en la tabla de validación de errores y se clasificaron en 7 diferentes resultados con el respectivo número de veces que ocurrió como se muestra en la tabla 5

Resultado	Error	# Veces
A	El software MES-4 se cierra	1
B	La caja no llega hasta el brazo robótico UR10	2
C	No se realiza el proceso de mecanizado	2
D	El brazo robótico UR10 no ejecutó el proceso	2
E	La puerta del centro de mecanizado no cierra	1
F	Se interrumpe el proceso de mecanizado	1
G	No hay error	1

Tabla 5. Errores proceso 1. Autoría propia

Al analizar el Gráfico 2 Se observa que no hay un resultado que ocurra más que los otros significativamente, cada uno de los errores tiene una frecuencia relativa entre el 10% y el 20%, Sin embargo, los resultados B, C y D representan el 60% de los resultados ocurrido.

	Resultado	# Errores	% Relativa	% Acumulado	Peso acumulado	Corte
1	B	2	20%	20%	0,14	65,71
2	C	2	20%	40%	0,29	31,43
3	D	2	20%	60%	0,43	2,86
4	A	1	10%	70%	0,57	27,14
5	E	1	10%	80%	0,71	51,43
6	F	1	10%	90%	0,86	75,71
7	G	1	10%	100%	1,00	100,00
		10				

Tabla 6. Información diagrama de Pareto – Proceso 2. autoría propia

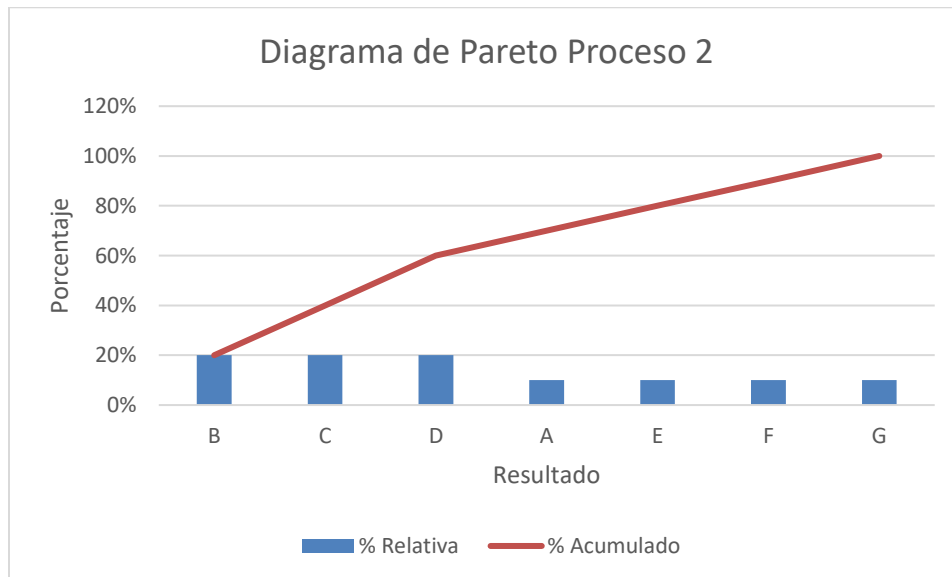


Gráfico 2. Diagrama de Pareto - Proceso 1. Autoría propia.

Se analizaron algunos de los resultados obtenidos donde se obtuvo lo siguiente:

- La Isla de trabajo MR buffer and robot for mill fue instalada para ubicarse de forma permanente dada la sensibilidad de los sensores y los puntos configurados para los robotinos, sin embargo, cuando en CNC es utilizado



para mecanizar es necesario mover la estación de trabajo para ajustar la prensa, cuando se realizan estos movimientos y la estación no queda ubicada en el lugar adecuado el UR10 se detiene al chocar con la prensa. En el anexo 10 encuentra un video con el error.

2. En algunas ocasiones la estación MR buffer and robot for mill pierde comunicación con el MES-4 y la orden de trabajo queda pendiente. Específicamente en el CNC, se debe tener en cuenta que los recursos tecnológicos que involucren comunicación no deberían ser prendidos y apagados de forma permanente, pero a causa de que en el CP factory no se cuenta con planta eléctrica o estabilizadores de energía, los equipos son encendidos y apagados constantemente.
3. En algunas ocasiones, la estación MR buffer and robot for mill pierde comunicación con el EMCO y con el MES-4, aunque se revisó cada una de las conexiones y el cableado de la estación, el error persiste de forma permanente, se buscó darle solución con ayuda de los técnicos del CTAI, sin embargo, no se logró encontrar que causaba el error. En el anexo 11 se encuentra el error.

Luego de realizar las validaciones se pudo concluir que el proceso cuenta con inestabilidad. Esto significa que cada vez que se intentan ejecutar los procesos de manufactura aparecen diferentes errores en las estaciones, de los cuales su mayoría son desconocidos y no se tiene el conocimiento adecuado para solucionarlos. Esto sumado a las limitaciones encontradas durante el proceso referentes a la automatización, causadas por las restricciones de los equipos género que los procesos de manufactura tengan un alto nivel de dificultad para ejecutarlos satisfactoriamente.

## **Componente de Diseño en ingeniería**

### ***Declaración de Diseño***

Este proyecto se centra en el diseño de un manual con el objetivo de desarrollar dos procesos de manufactura diferentes, por medio de la utilización de los equipos definidos previamente. Se tendrá en cuenta todo el proceso de diseño en ingeniería de producto, desarrollo de mecanizado CNC y la programación de nuevas configuraciones del MES en búsqueda de diferentes interacciones entre los equipos.

### ***Proceso de Diseño***

Para el desarrollo del diseño propuesto, se realizaron dos procesos de manufactura explicados detalladamente en el desarrollo de la metodología. Para el primer proceso, se desarrolló el diseño de la personalización de un producto en específico, ya que se pretende mostrar un producto final con elevada precisión, minimizando la intervención humana dentro del proceso. Adicionalmente, la producción de esta pieza se ajustó a las herramientas y características de los equipos del laboratorio, esto sumado a que se pretendía una interacción completa partiendo desde materia prima hasta producto terminado por medio de interacciones automatizadas entre los equipos, cumpliendo así una de las premisas de la industria 4.0. El prototipo final del primer proceso de manufactura se muestra a continuación:



*Ilustración 12. Prototipo del Proceso de Manufactura 1*

Para el desarrollo del segundo proceso de manufactura, se quiso evocar la personalización de productos que se pueden realizar por medio del proceso productivo propuesto a través del mecanizado CNC. Es importante recalcar que para el desarrollo de este prototipo se implementaron cambios que permitieron una nueva interacción y permitieron cambiar la

forma de mecanizar piezas en el laboratorio al poderlo hacer por las dos caras de la materia prima. El prototipo final del segundo proceso de manufactura se muestra a continuación:



*Ilustración 13. Prototipo del Proceso de Manufactura 2*

Estos prototipos respetan las restricciones estipuladas en el proyecto de grado, ya que los procesos de manufactura de estos productos están sujetos a los recursos que posee el Centro Tecnológico de Automatización Industrial (CTAI) de la Pontificia Universidad Javeriana, adicionalmente, se desarrollaron utilizando cuatro módulos del CP Factory (CNC milling machine Emco Concept Mill 450, AS/RS for boxes, Mobil robot Robotino for boxes, MR buffer) y los resultados de la ejecución de los procesos de manufactura, estuvieron sujetos a la disponibilidad y el correcto funcionamiento de los equipos del CTAI en el momento de su ejecución.

Finalmente, el diseño del manual aborda detalladamente cada uno de los pasos para el desarrollo óptimo de estos procesos de manufactura con el objetivo de que el usuario final cuente con las herramientas necesarias para desarrollar procesos similares que cumplan con los parámetros de operación del CP Factory.

#### ***Requerimientos de desempeño.***

El manual debe permitir guiar al lector durante el uso de los equipos del laboratorio abarcando el proceso de manufactura desde la inicialización de los equipos hasta el desarrollo completo de los productos establecidos. Adicionalmente, tendrán acceso a un recurso donde se explica el desarrollo de procesos de manufactura limitando la participación humana, utilizando los recursos del laboratorio, dando así pie a la práctica autónoma e independiente para las diferentes carreras de la facultad de Ingeniería.

#### ***Pruebas de rendimiento.***

Las pruebas de rendimiento se realizaron a través de la ejecución de cada uno de los procesos de manufactura en 10 ocasiones. Para el primer proceso de manufactura se obtuvo como resultado que se completó el proceso satisfactoriamente el 20% de las ejecuciones, mientras que para el segundo proceso de las 10 pruebas se completaron satisfactoriamente el 10%. Con esto se puede concluir que el proceso cuenta con inestabilidad sumado a las limitaciones encontradas durante el proceso referentes a la automatización causadas por las restricciones de los equipos, sin embargo, se logró cumplir con la totalidad de los objetivos propuestos.

#### ***Restricciones.***

- El proceso de manufactura está sujeto a los recursos que posee el CTAI.
- El proyecto está sujeto a la utilización de cuatro módulos del CIM de la Pontificia Universidad Javeriana (CNC milling machine Emco Concept Mill 450, AS/RS for boxes, Mobil robot Robotino for boxes, MR buffer).
- El proyecto está sujeto a los procesos que se puedan realizar con los módulos y las herramientas del CIM.
- El proyecto está sujeto a los tiempos de operación de cada uno de los módulos que conforman la integración.
- El alcance del trabajo se limita al diseño del manual. Por cuestiones de tiempo, no habrá un periodo de validación con estudiantes de la facultad de Ingeniería.
- Los resultados del proyecto estarán sujetos a la disponibilidad y el correcto funcionamiento de las maquinas del CTAI en el momento de su ejecución.

- Inicialmente se planteó que el desarrollo de los procesos iba a ser completamente automatizado, sin embargo, durante el desarrollo del proyecto se identificó una restricción adicional. El centro de mecanizado- CNC milling machine Emco Concept Mill 450 no está en la capacidad de ejecutar procesos completamente automatizados, ya que cuenta con una prensa mecánica, es decir que la materia prima debe ser ajustada por el usuario de forma manual.
- La materia prima por manufacturar está sujeta a las dimensiones de las ranuras de las cajas del almacén AS/RS for Boxes.
- La materia prima por manufacturar está sujeta al payload (capacidad de carga) y las dimensiones del gripper del brazo robótico UR10 para asegurar su correcta manipulación.
- El mecanizado de los prototipos finales está sujeto a las herramientas del centro de mecanizado- CNC milling machine Emco Concept Mill 450.

El diseño y desarrollo tanto de los procesos de manufactura como del manual fueron realizados teniendo en cuenta todas las restricciones encontradas, adicionalmente, el manual abarca todas estas restricciones para que el usuario conozca las consideraciones a tener en cuenta a la hora de realizar un producto por medio de los procesos de manufactura planteados.

### ***Cumplimiento del estándar***

Para el desarrollo de las piezas a manufacturar se realizó el proceso de diseño en ingeniería teniendo en cuenta las restricciones y parámetros definidos por los equipos del laboratorio. Para su ejecución se tuvieron en cuenta las normas técnicas para el desarrollo de los planos, se siguieron los parámetros y lineamientos establecidos por las normas ISO y el Sistema Americano de proyección de vistas. También, se identificaron las medidas de seguridad industrial presentes en el laboratorio, con el fin de conocer los dispositivos de seguridad implementados en el CP Factory teniendo en cuenta la utilización de robots industriales colaborativos para la ejecución de los procesos de manufactura planteados.

### **Limitaciones, conclusiones y recomendaciones.**

#### ***Conclusiones***

La industria 4.0 está generando grandes cambios en los requerimientos empresariales y educativos. Por este motivo, se debe tener en cuenta la necesidad de contar con personal capacitado en nuevas tecnologías y la necesidad de las Universidades en formar a futuros profesionales competentes en tecnologías innovadoras para lograr un acercamiento a esta industria. La Pontificia Universidad Javeriana realizó la compra de un CP Factory el cual permite simular y controlar procesos de producción y manufactura. Posterior a su compra, estos equipos fueron instalados e integrados con otros equipos con los que ya contaba la Universidad. Sin embargo, no se cuenta con documentación que permita desarrollar procesos de manufactura conjuntamente entre el CP Factory y el centro de mecanizado de control numérico computarizado (CNC).

Como solución para este problema, se realizó un manual de diseño y ejecución de dos procesos de manufactura con diferentes interacciones entre los equipos, haciendo uso de la integración entre tres módulos del CP Factory y el centro de mecanizado CNC por medio de todas las fases de desarrollo del proceso de manufactura de dos productos. El manual permite al lector conocer todas las etapas que se deben llevar a cabo en los procesos planteados, desarrollando de forma detallada y abarcando las consideraciones para tener en cuenta a la hora de operar los equipos del laboratorio de forma adecuada.

Inicialmente, se identificaron las características y configuraciones de cada uno de los equipos, lo que permitió tener una noción del funcionamiento individual de cada uno de estos para posteriormente aprender a utilizarlos de manera conjunta dentro de los procesos productivos planteados.

Posteriormente, entendiendo la integración realizada previamente por Festo y teniendo en cuenta las interacciones que quedaron programadas, se definieron los dos procesos de manufactura a realizar en este trabajo de grado. Para el primer caso se ejecutaron y validaron los parámetros bases de la integración realizada, mientras que para el segundo se demostró que es posible agregar una nueva configuración donde se logró cambiar la programación original para agregar un giro y que la materia prima se pudiera mecanizar por sus dos caras dentro de la misma orden de producción, cumpliendo con todas las restricciones y etapas del proceso. Es importante destacar las limitaciones existentes en las variaciones de programación

dentro de la integración, ya que únicamente se pueden realizar variaciones en el brazo robótico y el centro de mecanizado CNC, esto se debe a que independientemente del proceso de manufactura el funcionamiento del robotino y el almacén es el mismo.

Por último, se logró la transformación de la materia prima en producto terminado a través del mecanizado CNC, lo que permitió comprobar la efectividad de este tipo de mecanizado en la industria y se realizó la validación del manual ejecutando cada uno de los procesos de manufactura en 10 ocasiones. Para el primer proceso de manufactura se obtuvo como resultado que se completó el proceso satisfactoriamente el 20% de las ejecuciones, mientras que para el segundo proceso de las 10 pruebas se completaron satisfactoriamente el 10%. Con esto se comprobó que el proceso cuenta con inestabilidad sumado a las limitaciones encontradas durante el proceso referentes a la automatización causadas por las restricciones de cada uno de los equipos.

### Limitaciones y recomendaciones

- Por seguridad del estudiante y para dar un correcto uso de los equipos siempre se debe estar acompañado de personal capacitado en el manejo del CP factory, aunque en el manual se detallan los pasos para realizar el proceso de manufactura por completo, se recomienda estar acompañado de personal del CTAI o profesores con conocimiento en el manejo del MES-4 y los equipos en caso de que se presente algún inconveniente.
- Para que el proceso se lleve a cabo de forma completamente automatizada es necesario realizar la compra de una prensa automática para disminuir la intervención humana en el proceso.
- Uno de los sensores de la banda transportadora que da ingreso a la estación MR Buffer está presentando fallas, por lo que se recomienda realizar una revisión por los técnicos especializados de Festo, dado que esto impide la interacción de esta estación con los robotinos.
- Revisar la configuración del software DNP presente en el computador de CNC, ya que se pierde constantemente la conexión con el MES-4 y con el PLC.

### Anexos

Anexo	Título
Anexo 1	<u>Manual de diseño y ejecución de dos procesos de manufactura, haciendo uso de la integración entre tres módulos del CP Factory y el centro de mecanizado CNC</u>
Anexo 2	<u>Planos técnicos de piezas a manufacturar</u>
Anexo 3	<u>Códigos CNC</u>
Anexo 4	<u>Caracterización de los equipos</u>
Anexo 5	<u>Diagramas de flujo de equipos y procesos</u>
Anexo 6	<u>Tabla de validación de errores en los procesos</u>
Anexo 7	<u>Videos de Proceso y Giro</u>
Anexo 8	<u>Error 1</u>
Anexo 9	<u>Error 2</u>
Anexo 10	<u>Error 3</u>
Anexo 11	<u>Error 4</u>

### Referencias

- Centro Integrado de Manufactura / Integrated Manufacturing Center. (n.d.). Retrieved March 19, 2022, from <https://ingenieria.javeriana.edu.co/w/edificio-piso-2-2?redirect=%2F nuestro-edificio>
- Acevedo Amaya, M. R., Ortega-Jiménez, C. H., Machuca, J. A. D., & Alfalla-Luque, R. (2020). Industry 4.0: Current trend and future scope for further research in high performance manufacturing. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 1–10. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.303>
- Alejandro, F., Jimenez, C., Delgado, S., & Andrea, M. (2021). [ 211008 ] Horizontal integration of a Logistics System to the CP Factory Production System . *Case Study : Javeriana University*. 1–25.
- Avila, H. A., Echeverria, A., Gomez, J., Cárdenas, A., & Jimenez, J. (2020). *Ingeniería industrial*. 2019.
- Benesova, A., Hirman, M., Steiner, F., & Tupa, J. (2018). Analysis of Education Requirements for Electronics Manufacturing within Concept Industry 4.0. *Proceedings of the International Spring Seminar on Electronics Technology, 2018-May*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2018.8443681>

- Bohórquez, C., Alejandra, M., Suárez, D., Nathalia, N., Cárdenas, A., Zambrano, M., Fernando, J., & Gordillo, J. (2022). *Prácticas de laboratorio para el desarrollo de competencias en industria 4.0. Caso: Laboratorio Universidad Javeriana*.
- Cuscatlán, A., Libertad, L., & Salvador, E. (2016). "SIMULACIÓN INDUSTRIAL DE FLUJOS DE PROCESOS EN ENTORNOS CIM."
- Didactic, F. (2019). *AS / RS for pallets*.
- Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería | Componente Práctico / Escenarios remotos - Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD - Educación Virtual. (n.d.). Retrieved March 25, 2022, from <https://estudios.unad.edu.co/componente-practico-ebti/escenarios-remotos-ecbti>
- Festo. (n.d.). *Reference Projects Global Project Solutions*. [www.festo-didactic.com](http://www.festo-didactic.com)
- Festo Didactic. (2019a). *8058820 Robotino Manual*. [www.festo-didactic.com](http://www.festo-didactic.com)
- Festo Didactic. (2019b). *8062569 MR buffer and robot for mill CP Factory Manual*. [www.festo-didactic.com](http://www.festo-didactic.com)
- Festo entrega certificación internacional a un ambiente del SENA para automatización y mecatrónica, en Antioquia. (n.d.). Retrieved March 31, 2022, from <https://www.sena.edu.co/es-co/Noticias/Paginas/noticia.aspx?IdNoticia=3076>
- Gabriel Mauricio Zambrano Rey, Carlos Alberto Parra Rodríguez, Martha Ruth Manrique Torres, & César Julio Bustacara Medina. (2007). *Estación de control de calidad por visión artificial para un centro de manufactura integrada por computadora (CIM)* (Vol. 11, Issue 1).
- Grodzki, J., Ortelt, T. R., & Tekkaya, A. E. (2018). Remote and Virtual Labs for Engineering Education 4.0. In *Procedia Manufacturing* (Vol. 26, pp. 1349–1360). <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.126>
- Grupo Festo - Compañía - Festo Didactic. (n.d.). Retrieved March 7, 2022, from <https://www.festo-didactic.com/int-es/compania/grupo-festo/?fbid=aW50LmVzLjU1Ny4xNC4xMC4zNDc1LjQxNDI>
- LAB AIA | Uniandes. (n.d.). Retrieved March 19, 2022, from <https://industrial.uniandes.edu.co/es/laboratorio-aia>
- Laboratorio de Desarrollo Tecnológico | Universidad Central. (n.d.). Retrieved March 19, 2022, from <https://www.ucecentral.edu.co/ficb/laboratorio-desarrollo-tecnologico>
- Laboratorio de Manufactura - Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. (n.d.). Retrieved March 19, 2022, from <https://www.escuelaing.edu.co/es/campus/laboratorio-de-manufactura/>
- Laboratorio de Mecanizado CNC - Universidad ECCI. (n.d.). Retrieved March 19, 2022, from [https://www.ecci.edu.co/laboratorios\\_sedes/laboratorio-de-mecanizado-cnc/](https://www.ecci.edu.co/laboratorios_sedes/laboratorio-de-mecanizado-cnc/)
- Lozano, C. V., & Vijayan, K. K. (2020). Literature review on cyber physical systems design. *Procedia Manufacturing*, 45(2019), 295–300. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.020>
- Mahmood, K., Karaulova, T., Otto, T., & Shevtshenko, E. (2017). Performance Analysis of a Flexible Manufacturing System (FMS). *Procedia CIRP*, 63, 424–429. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.123>
- MinTic. (2019). *Aspectos básicos de la industria 4.0*.
- Miranda, J., Navarrete, C., Noguez, J., Molina-Espinosa, J. M., Ramírez-Montoya, M. S., Navarro-Tuch, S. A., Bustamante-Bello, M. R., Rosas-Fernández, J. B., & Molina, A. (2021). Educación 4.0 The core components of education 4.0 in higher education: Three case studies in engineering education. *Computers and Electrical Engineering*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107278>
- Moloi, T. S., & Salawu, M. K. (2022). Institutionalizing Technologies in South African Universities towards the Fourth Industrial Revolution. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, 17(03), 204–227. <https://doi.org/10.3991/ijet.v17i03.25631>
- Proyectos tecnológicos | Festo CO. (n.d.). Retrieved March 7, 2022, from [https://www.festo.com/co/es/e/educacion/conceptos-educativos/proyectos-de-referencia-id\\_31435/](https://www.festo.com/co/es/e/educacion/conceptos-educativos/proyectos-de-referencia-id_31435/)
- Retamoso, C. E. F., Aguirre Mayorga, S., Bibiana, N., & Pinzón, C. (n.d.). *EVOLUCIÓN DE UN SISTEMA DE MANUFACTURA FLEXIBLE (FMS) A UN SISTEMA DE MANUFACTURA INTEGRADA POR COMPUTADOR (CIM)\**.
- Sackey, S. M., Bester, A., & Adams, D. Q. (2020a). A framework for an industrial engineering learning facility paradigm toward industry 4.0. *South African Journal of Industrial Engineering*, 31(1), 122–132. <https://doi.org/10.7166/31-1-1796>
- Sackey, S. M., Bester, A., & Adams, D. Q. (2020b). UN MARCO PARA UN PARADIGMA DE INSTALACIONES DE APRENDIZAJE DE INGENIERÍA INDUSTRIAL HACIA LA INDUSTRIA 4.0 A framework for an industrial engineering learning facility paradigm toward industry 4.0. *South African Journal of Industrial Engineering*, 31(1), 122–132. <https://doi.org/10.7166/31-1-1796>
- Schubert, D. T. (n.d.). *Hands-On Tutorial CIROS / MES4*.
- Shojaeinasab, A., Charter, T., Jalayer, M., Khadivi, M., Ogunfowora, O., Raiyani, N., Yaghoubi, M., & Najjaran, H. (2022). Intelligent manufacturing execution systems: A systematic review. *Journal of Manufacturing Systems*, 62(September 2021), 503–522. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.01.004>
- States, M. (2013). *Industrial Performance Scoreboard*.
- Universal Robots. (2016). *El futuro es colaborativo Conozca al líder mundial*. 11.
- Universal Robots. (2018). *Universal Robots e-Series Manual de usuario UR10e Traducción de las instrucciones originales (es)*. 203.
- Zalud, L., Burian, F., & Kalvodova, P. (2019). Industry 4.0 Testbed at Brno University of Technology. In *Bioinform Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics): Vol. 11472 LNCS*. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-14984-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14984-0_13)
- Zębala, W., Struzikiewicz, G., & Franczyk, E. (2021). Adaptation of CNC Machine Tools in Educational Center That Matches the Concept of Industry 4.0. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 277–288. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-62784-3\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-62784-3_23)