



**Rediseño e implementación del Escáner 3D ESPEL, indexado al CIM como
estación de escaneo 3D en el laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas
ESPE Sede Latacunga**

Cadena Corral, Mateo Sebastian

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico

Ing. Acuña Coello, Fausto Vinicio

22 de febrero del 2023

Latacunga

Reporte de verificación de contenidos

Document Information

Analyzed document	TESIS MATEO - CADENA.pdf (D158941256)
Submitted	2/17/2023 10:09:00 PM
Submitted by	Juan Carlos Altamirano
Submitter email	jc.altamiranoc@uta.edu.ec
Similarity	1%
Analysis address	jc.altamiranoc.uta@analysis.urkund.com

Sources included in the report

SA**Revision10.3.docx**

Document Revision10.3.docx (D110213015)

 7

Acuña Coello, Fausto Vinicio

C. C 0501510267

Director



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Rediseño e implementación del escáner 3D ESPEL, indexado al CIM como estación de escaneo 3D”** fue realizado por el señor **Cadena Corral, Mateo Sebastián**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 22 de febrero del 2023

Acuña Coello, Fausto Vinicio

C.C. 0501510267

Director



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Cadena Corral, Mateo Sebastián**, con cédula de ciudadanía n°1726264268, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Rediseño e implementación del escáner 3D ESPEL, indexado al CIM como estación de escaneo 3D”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 22 de febrero del 2023

Cadena Corral, Mateo Sebastián

C.C. 1726264268



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Autorización de Publicación

Yo **Cadena Corral, Mateo Sebastián**, con cédula de ciudadanía n°1726264268, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **“Rediseño e implementación del escáner 3D ESPEL, indexado al CIM como estación de escaneo 3D”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Latacunga, 22 de febrero del 2023

.....
Cadena Corral, Mateo Sebastián

C.C. 1726264268

Dedicatoria

A Dios por permitirme culminar esta etapa en mi vida y por poner a las mejores personas a mi lado.

A mis padres Claudia y Carlos, por ser el motor y pilar de mi vida, por el apoyo incondicional a lo largo de la carrera y su confianza. Gracias por enseñarme la importancia del trabajo duro, la constancia y por todos los valores que me han inculcado; esta tesis también es su triunfo.

A mi hermano Andrés por llenarme de felicidad todos los días que más lo he necesitado, gracias por ser mi fuente constante de motivación y superación, sin tu apoyo nada de esto hubiera sido posible, gracias ñaño.

A mis abuelitos maternos Piedad y Ángel, por acogerme en su hogar, por el cuidado, amor y sabiduría que brindan a mi día a día, gracias por ser mi ejemplo a seguir. Su amor incondicional y legado siempre serán una guía en mi vida

A mis abuelitos paternos Gloria y Carlos, por todas las oraciones y apoyo a la distancia que me brindaron a lo largo de la carrera y por todos los consejos. Gracias por enseñarme que la educación es la clave para el éxito y superación personal.

A mis tíos Alexandra y Germán, gracias por cuidar de mi como a un hijo más, por las horas de apoyo incondicional, consejos, llamadas de atención y por siempre haber estado pendientes de mi a lo largo de toda la carrera.

A mi novia Karlita, mi compañera y confidente en cada momento. Gracias por tu comprensión y por creer en mí, gracias por motivarme a no rendirme y por tu apoyo en cada desafío que se me ha presentado.

Y a mis hermanos queridos Ana, Emily, Germán, Víctor y María que siempre me brindaron su apoyo desde pequeños, compartimos mil aventuras juntos y ahora me siento muy feliz por poder compartir este logro con ustedes.

Esta tesis está dedicada a todos ustedes, por su amor, paciencia y confianza en mis capacidades. Sin su apoyo este logro no hubiera sido posible, les agradezco de todo corazón por haber caminado de mi lado a lo largo de esta aventura académica.

Con mucho amor para todos ustedes

Mateo Sebastián Cadena Corral

Agradecimientos

Este proyecto no hubiera sido posible sin la ayuda, apoyo y ánimo de muchas personas. Por ello quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a cada una de ellas.

En primer lugar, agradecer a toda mi familia, en especial a mis abuelitos Ángel y Piedad por su amor, su apoyo incondicional y por ser mi fuente constante de motivación. Agradezco su paciencia y comprensión en momentos de estrés y por nunca dejar de creer en mí.

Al ingeniero Fausto Acuña por su guía y paciencia a lo largo del proyecto; gracias por compartir conmigo sus conocimientos y por motivarme a dar lo mejor de mí en este proyecto.

Agradezco de manera especial a mis compañeros de carrera Israel Diaz, Steven Curipallo y Tomas Cobeña por su amistad incondicional a lo largo de la carrera, por brindarme su compañía y conocimiento; y por hacer de todo este camino algo más llevadero. Gracias por su amistad y por haber formado parte esencial de este proceso.

Por último, quiero agradecer a todos aquellos que, de una u otra forma, formaron parte de este proyecto. Su colaboración y ayuda fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos.

De nuevo, muchas gracias a todos y cada uno de ustedes por su contribución a este trabajo.

Con gratitud,

Mateo Sebastian Cadena Corral

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula.....	1
Reporte de verificación de contenidos	2
Certificación	3
Responsabilidad de Autoría	4
Autorización de Publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos	8
Índice de contenidos.....	9
Índice de tablas.....	13
índice de figuras.....	15
Resumen.....	18
Abstract	19
Capítulo I: Conceptos generales y Estado del arte.....	20
Definiciones.....	20
Manufactura integrada por computadora (CIM)	20
Tipos de CIM.....	21
CIM para procesos industriales continuos	21
CIM para producción industrial en masa.....	22
CIM para producción por lotes	22
Partes del CIM	22
Hardware.....	22
Software	23
Roles del CIM.....	23
Diseño de producto.....	23

	10
Planeación	24
Ingeniería de manufactura.....	24
Hardware de automatización de fabrica.....	24
Manejo de información	24
Escáner 3D	24
Tipos de escáneres 3D.....	24
Escáner activo	25
Principio de triangulación laser.....	26
Nube de puntos.....	26
Posprocesado.....	26
Estado del arte.....	27
Estado del arte del CIM	27
Usos de tecnología de escaneo 3D en la industria ecuatoriana	34
Estado del arte de tecnología de escaneo 3D indexada al CIM.....	35
Línea base	42
Escáner 3D rotativo laser	42
Alternativas de solución.....	43
Alternativa de solución para el CIM.....	43
Selección de alternativa de solución para el CIM	44
Alternativas de solución para el Escáner 3D	45
Selección de alternativa de solución para el Escáner 3D.....	46
Parámetros de diseño.....	47
Capítulo II: Diseño y selección de componentes	49
Selección de componentes mecatrónicos.....	49
Selección de controlador	49

	11
Selección de protocolo de comunicación	51
Selección de sistema para la comunicación	54
Selección de lenguaje de programación	56
Alternativas para el diseño mecánico.....	58
Selección para material para la mesa de trabajo.....	58
Selección de material de impresión para fabricación de piezas de estructura	59
Diseño Mecatrónico	62
Diseño Mecánico	62
Diseño Electrónico	63
Diseño de aplicación.....	65
Capítulo III: Implementación del proyecto	68
Elementos de la estructura del escáner	68
Montaje del escáner como estación de escaneo	69
Montaje de la estación de escaneo en el sistema de manufactura integrada por computador	72
Simulación de la estación de escaneo 3D indexada al CIM.....	74
Conexiones de ordenador, placas y elementos externos.....	77
Desarrollo de aplicación para indexación al sistema CIM	77
Calibración	78
Visualización del proceso de escaneo en tiempo real.....	79
Proceso de escaneo	79
Guardado de archivo de nube puntos	80
Implementación de la comunicación	80
Uso de protocolos MQTT.....	80
Uso de MQTT a nivel del CIM	83

	12
Capítulo IV: Pruebas y resultados	85
Pruebas de protocolo MQTT	85
Pruebas de funcionamiento del escáner 3D	87
Pruebas de escaneo 3D independientes	88
Análisis de resultados de escaneo 3D independiente al CIM.....	90
Pruebas de funcionamiento como estación de escaneo indexado al CIM.....	92
Pruebas de escaneo 3D indexado a un sistema CIM.....	93
Posprocesado y análisis	96
Validación de la hipótesis	102
Validación de hipótesis individual.....	102
Variables de la hipótesis.....	102
Validación de hipótesis general.....	104
Variables de la hipótesis.....	105
Análisis de costo vs. beneficio.....	107
Capítulo IV: Conclusiones y recomendaciones.....	108
Conclusiones.....	108
Recomendaciones	110
Bibliografía	111
Anexos	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Selección de alternativa de solución para el desarrollo del CIM	44
Tabla 2 Selección de alternativa de solución para el desarrollo del Escáner 3D.....	47
Tabla 3 Selección de controlador por criterios ponderados.....	51
Tabla 4 Selección de protocolo de comunicación por criterios ponderados.....	53
Tabla 5 Selección de sistema para la comunicación por criterios ponderados	55
Tabla 6 Selección de lenguaje de programación por criterios ponderados.....	57
Tabla 7 Selección de material para mesa de trabajo por criterios ponderados.....	59
Tabla 8 Propiedades mecánicas del ácido poliláctico PLA.....	60
Tabla 9 Propiedades mecánicas del ABS	61
Tabla 10 Selección de material de impresión 3D para la estructura por criterios ponderados..	61
Tabla 11 Comandos a enviar en tópico Test, funciones a ejecutar y mensajes de estado en tópico Test1 para las pruebas de la estación de escaneo 3D.....	86
Tabla 12 Ensayos de aplicación de protocolos MQTT sobre el escáner 3D	86
Tabla 13 Descripción y resultados de los ensayos de funcionamiento realizados sobre el escáner 3D	87
Tabla 14 Pruebas de escaneo realizadas sobre objetos de distintas complejidades	89
Tabla 15 Aplicación de los criterios de comparación estéticos de la norma ASTM F2792-12...	91
Tabla 16 Mensajes de estado de estaciones recibidos en el ordenador central al ejecutar rutinas en la estación de escaneo 3D.....	93
Tabla 17 Pruebas de escaneo sobre piezas mecanizadas en metal.....	94
Tabla 18 Etapa de posprocesado de nubes de puntos obtenidas en pruebas sobre piezas mecanizadas.....	96
Tabla 19 Medidas de la pieza mecanizada en metal y el sólido escaneado .STL	98
Tabla 20 Diferencia de medidas de la pieza mecanizada en metal y el sólido escaneado STL.	98

Tabla 21 Toma de medidas de longitud de piezas cilíndricas y cálculo de error promedio	99
Tabla 22 Comparación de índices porcentuales obtenidos en pruebas	104
Tabla 23 Comparación de índices porcentuales obtenidos a través aplicando encuestas.....	106
Tabla 24 Costo de implementación de estación de escaneo 3D	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ejemplo de un CIM para mecanizado, conformado por componentes principales para su funcionamiento	21
Figura 2 Roles que debe desempeñar el CIM.....	23
Figura 3 Principio de funcionamiento de un escáner 3D activo o por sensado sin contacto.....	25
Figura 4 Nube de puntos generada por el análisis de un escáner 3D sobre la superficie superior de un rectángulo.....	26
Figura 5 Celda de manufactura robotizada para replicar piezas en 3D	28
Figura 6 Elaboración de prótesis de manos usando técnicas de prototipado rápido y sistemas flexibles de manufactura asistida para computadora.....	29
Figura 7 Arquitectura del prototipo simplificada	31
Figura 8 Sistema de escaneo propuesto.....	33
Figura 9 CIM propuesto para modelar en el proyecto.....	36
Figura 10 HMI diseñado para la estación de control de calidad por visión artificial indexado a un CIM	39
Figura 11 Arquitectura propuesta para el sistema de visión artificial indexado a un centro integrado de manufactura CIM.....	41
Figura 12 Escáner 3D rotativo con principio de triangulación Laser del laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPEL	43
Figura 13 Diseño del CIM tipo 1 en configuración lineal con estación de escaneo indexada ...	63
Figura 14 Orden jerárquico de la etapa de control del escáner 3D.....	64
Figura 15 Proceso de intercambio de datos y comunicación escáner/ordenador central	65
Figura 16 Sistema de manufactura integrada por computadora con estación de escaneo indexada al CIM y n estaciones	65

Figura 17 <i>Componentes básicos de la aplicación ordenados de acuerdo a su importancia para la implementación en un CIM</i>	66
Figura 18 <i>Piezas impresas en 3D a utilizar para el rediseño de la estación de escaneo 3D</i>	68
Figura 19 <i>Estado del escáner 3D antes de su rediseño como estación de escaneo 3D.....</i>	69
Figura 20 <i>Módulos laser comerciales.....</i>	70
Figura 21 <i>Soporte de laser montado sobre varillas roscadas.....</i>	71
Figura 22 <i>Pieza en L de madera pintada de color negro para el fondo de la estación de escaneo</i>	71
Figura 23 <i>Prototipo listo para su implementación como estación de escaneo 3D.....</i>	72
Figura 24 <i>Mesa para montaje de estación de escaneo 3D dentro del sistema de manufactura integrada CIM</i>	73
Figura 25 <i>Distribución del CIM con manipulador y estación de escaneo 3D indexada</i>	74
Figura 26 <i>Simulación de la estación de escaneo indexada al CIM</i>	75
Figura 27 <i>Simulación y trazado de trayectoria de rutina de posicionamiento de pieza de la estación de escaneo 3D.....</i>	76
Figura 28 <i>Simulación y trazado de trayectoria de rutina de retiro de pieza de la estación de escaneo 3D.....</i>	76
Figura 29 <i>Conexión de dispositivos en puertos USB del ordenador y captura de dispositivos. 77</i>	77
Figura 30 <i>Apartado de configuración de parámetros de captura de escaneo y segmentación. 78</i>	78
Figura 31 <i>Visualización de solido en tiempo real durante proceso de escaneo</i>	79
Figura 32 <i>Ventana de mensaje generada en la estación una vez finalizado el proceso de escaneo</i>	80
Figura 33 <i>Logotipo de MQTT y bróker Mosquitto</i>	81
Figura 34 <i>Clase TestMQTT creada para la ejecución de comandos de la estación de escaneo 3D indexada al CIM.....</i>	82

Figura 35 <i>Creación de la clase PubMQTT encargada de la publicación de datos del estado de la estación de escaneo en el servidor central.....</i>	82
Figura 36 <i>Topología de red del escáner 3D indexado al CIM como estación de escaneo 3D..</i>	83
Figura 37 <i>Topología de red MQTT de la estación de escaneo 3D y robot manipulador indexados al CIM.....</i>	83
Figura 38 <i>HMI desarrollado para el control del CIM, ubicado en sección de estación de escaneo 3D.....</i>	84
Figura 39 <i>Ingreso de comandos para publicar en tópico Test y suscribir en el tópico Test1 para pruebas de comunicación desde la PC.....</i>	85
Figura 40 <i>Grafica de promedio de errores obtenidos en la longitud de figuras cilíndricas.....</i>	100
Figura 41 <i>Grafica de promedio de errores obtenidos en la longitud de figuras esféricas.....</i>	100
Figura 42 <i>Grafica de promedio de errores obtenidos en la longitud de figuras cúbicas.....</i>	101

Resumen

La tecnología de digitalización de modelos 3D o escáner 3D es un dispositivo capaz de generar a través de distintas técnicas de escaneo una interpretación de un sólido en el espacio, puede captar su geometría, detalles, colores, etc. El proceso de digitalización genera una nube de puntos, la misma que después de una etapa de posprocesado se encuentra lista para su aplicación en reproducción del sólido o análisis. Existen escáneres de distintos niveles de precisión, esta tecnología se usa cada vez más en la industria nacional e internacional. El escáner desarrollado se basa en el proyecto de desarrollo libre Horus, un escáner 3D por triangulación laser de altas prestaciones, para el control del escáner se utiliza una PC y el control de sus elementos electrónicos es llevado a cabo por una tarjeta controladora ZUM Core Scan. La indexación del escáner 3D dentro de un sistema de manufactura integrada por computadora CIM permite el desarrollo de nuevas tendencias de tecnología en la industria, mediante un ordenador central se ejecuta el envío de comandos hacia la estación de escaneo, previo al proceso de digitalización un manipulador robótico Scorbot se encarga de colocar la pieza a escanear en la mesa de trabajo y automáticamente da paso a la etapa de escaneo.

Palabras clave: Escáner 3D, triangulación laser, estación de escaneo, protocolos MQTT, tópico, Manufactura integrada por computadora (CIM)

Abstract

Digitalization technology of 3D models or a 3D scanner is a device capable of generating through different scanning techniques an interpretation of a solid in space, it can capture its geometry, details, colors, etc. The digitization process generates a point cloud, which after a post-processing stage is ready for its application in solid reproduction or analysis. There are scanners with different levels of precision, this technology is used more and more in the national and international industry. The developed scanner is based on the Horus free development project, a high-performance laser triangulation 3D scanner. A PC is used to control the scanner and the control of its electronic elements is carried out by a ZUM Core Scan controller card. The indexing of the 3D scanner within a CIM system (computer integrated manufacturing) allows the development of new technology trends in the industry, through a central computer, different commands are sent to the scanning station, prior to the digitization process a Scorbot robotic manipulator is in charge of placing the piece to be scanned on the work table and automatically allows the scanning stage to be started.

Keywords: 3D scanner, laser triangulation, scanning station, MQTT protocols, topic, computer integrated manufacturing (CIM)

Capítulo I

Conceptos generales y Estado del arte

Definiciones

Manufactura integrada por computadora (CIM)

Con el pasar del tiempo, las técnicas de manufactura han avanzado exponencialmente, permitiendo a las industrias una producción mucho más ágil, eficaz y menos propensa a errores. Con el fin de obtener un mayor nivel de ventajas competitivas las industrias manufactureras de alta tecnología buscan la integración de distintas disciplinas de la ingeniería de manera de conseguir mayores prestaciones durante la producción.

Esta integración es conocida como manufactura integrada por computadora CIM (Computer Integrated Manufacturing). Se puede definir como una estrategia y filosofía de producción, basada en la integración de datos e información de distintas etapas de un proceso a través de sistemas informáticos y el uso de medios de control y supervisión de procesos y eventos; es decir, es la técnica del uso de ordenadores o computadoras para controlar completamente un proceso de producción (Armagard Ltd, 2020).

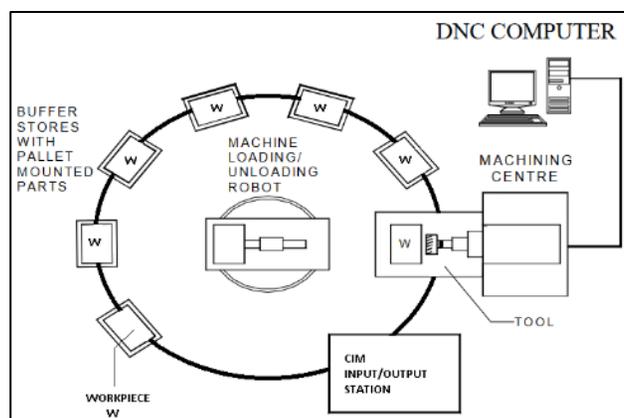
Mediante el uso de la potencia de los ordenadores actuales se cumplen los objetivos del CIM, existen tres factores predominantes para el funcionamiento correcto de un CIM: integración de componentes, manejo de datos y control de procesos.

De esta manera una definición concreta del CIM es un método de manufactura donde el proceso a ejecutar se encuentra totalmente controlado y monitorizado por una unidad central o computadora. A continuación, en la **Figura 1** se muestra una representación de un CIM que

utiliza una estación de mecanizado, un manipulador para mover las piezas, una unidad de control y monitoreo y una unidad para entrada y salida de material y piezas mecanizadas.

Figura 1

Ejemplo de un CIM para mecanizado, conformado por componentes principales para su funcionamiento



Nota. Tomada de (Balamurugan, 2021)

Tipos de CIM

Debido a la variedad de elementos producidos por el sector de manufactura el uso de un CIM puede beneficiar a cada una de las industrias, dependiendo del tipo de aplicación; a continuación, se describen los tipos CIM que pueden usar para las distintas áreas de la industria de acuerdo con el criterio del autor (Balamurugan, 2021).

CIM para procesos industriales continuos

Sistemas utilizados para procesos de producción con secuencias específicas. Se caracterizan por una sencilla implementación basada principalmente en procesos secuenciales establecidos en el ordenador. Ejemplos más comunes de este tipo de sistemas son refinerías, plantas químicas y proceso de alimentos. También conocido como CIM tipo I.

CIM para producción industrial en masa

Produce elementos en grandes cantidades, el uso del CIM permitirá la optimización de líneas de producción en masa complejas permitiendo una operación automatizada con relaciones costo calidad efectivas. En este tipo de sistemas se pueden indexar estaciones de procesos continuos. También conocido como CIM tipo II.

CIM para producción por lotes

En la industria de manufactura la mayor parte de producción se realiza en forma de lotes, debido al número de ejemplares producido (pequeña a mediana escala). En este tipo de sistemas se requiere una mayor cantidad de componentes u operaciones a realizar por lo cual el nivel de complejidad incrementa, el CIM permite realizar los procesos de manufactura necesarios de una manera óptima ya que, al ser producciones complejas, pero de menor escala hay altas probabilidades de mala administración del tiempo. También conocido como CIM tipo III.

Partes del CIM

Los autores (Rando, 2002, p. 171) y (Groover, 2007, p. 918) sugieren al lector que las partes de un CIM se engloban en dos conjuntos principales, hardware y software.

Hardware

El hardware del CIM es conformado por todos los equipos físicos como máquinas CNC, centros de trabajo computarizados, celdas robóticas, dispositivos de almacenamiento, sensores, dispositivos de inspección, ordenadores, etc.

Software

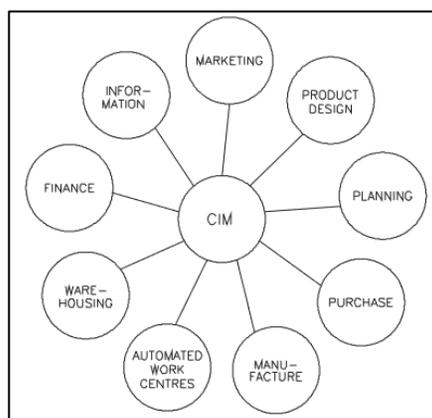
Los elementos pertenecientes al software de un sistema de manufactura integrada por computadora son todos aquellos que se encargan de desarrollar funciones como: manejo de datos, modelamiento, diseño, análisis, simulaciones, monitoreo, control, comunicaciones, inventarios, flujo de trabajo, manejo de calidad, planeación, gestión de red, etc.

Roles del CIM

El autor (Radhakrishnan et al., 2008) establece que, los sistemas CIM cumplen 9 roles principales: marketing, diseño, planeación, compra, manufactura, centros de trabajo automatizado, almacenamiento, finanzas e información como se muestra en la **Figura 2**.

Figura 2

Roles que debe desempeñar el CIM



Nota. Tomada de (Radhakrishnan et al., 2008)

Diseño de producto

Se desarrollan actividades de modelamiento geométrico, mediante el uso de sistemas CAD considerando las especificaciones y requerimientos del producto.

Planeación

Toma los datos establecidos por los anteriores elementos y crea un plan óptimo para su producción. Se toma en cuenta características tales como materiales, herramientas, tipos de operaciones, ensamble, inspección, etc.

Ingeniería de manufactura

Tomando los datos requeridos, se realiza actividades como calibraciones, simulaciones y planificación asistida por computadora. Requiere de mucho procesamiento de información en tiempo real para asegurar una actividad de producción continua.

Hardware de automatización de fabrica

Lleva a cabo el proceso de manufactura establecido, mediante el uso de los distintos tipos de hardware del CIM como maquinaria CNC, estaciones de trabajo, celdas robóticas, etc.

Manejo de información

Es la parte más crucial del CIM ya que es la que permite la comunicación entre máquinas dentro del sistema, comunicaciones, integración de componentes y control.

Escáner 3D

El autor (López, 2016) establece que el escáner 3D es un dispositivo con la capacidad de permitir la detección o sensado de distintas superficies de objetos del mundo real, con el fin de recopilar datos que representarán los distintos puntos de las superficies en el objeto en una malla o nube de puntos.

Tipos de escáneres 3D

De acuerdo con el criterio del autor (Curless, 2017) los escáneres 3D son catalogados de acuerdo al tipo de tecnología que utilizan, su base de funcionamiento se divide según

los tipos de sensores usados, de contacto y sin contacto; de la misma manera pueden ser clasificados como escáneres activos y pasivos.

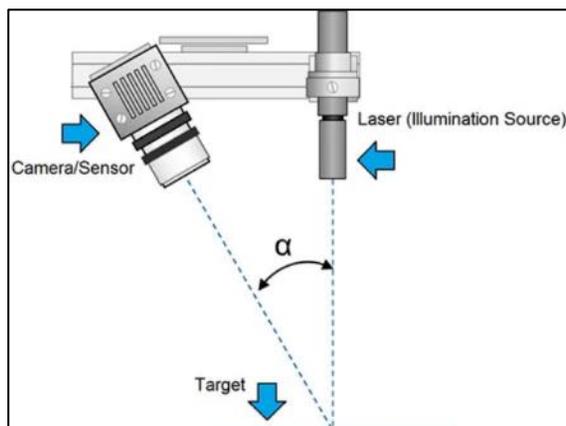
Los escáneres activos se dividen de acuerdo a los principios de funcionamiento: tiempo de vuelo y luz estructurada. De la misma manera la clasificación de los escáneres pasivos es en base al mismo principio, existen del tipo: estereoscópicos, detectores de silueta y por principios de palpación. En el presente proyecto se utiliza un escáner 3D activo de mesa rotativa con principio de triangulación laser.

Escáner activo

El escáner 3D de tipo activo es aquel que utiliza tecnología de sensado sin contacto, se caracterizan por emplear un tipo de radiación como: ultrasonido, laser, rayos x, haces de luz, etc. En la **Figura 3** se presenta el principio básico descrito anteriormente

Figura 3

Principio de funcionamiento de un escáner 3D activo o por sensado sin contacto. Se presenta el uso de un escáner 3D activo de principio de triangulación.



Nota. Tomada de (Beraldin et al., 2003)

Principio de triangulación laser

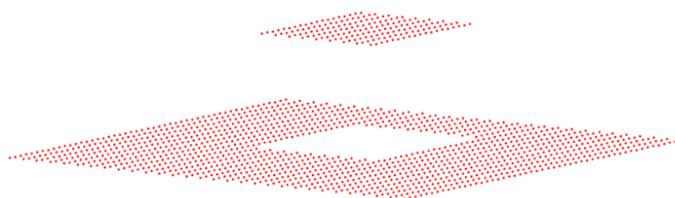
El principio de triangulación laser se basa en el uso de haces de laser complementado por un dispositivo detector de posicionamiento, se emite un pulso breve de laser que será parcialmente reflejado por el detector de posicionamiento con la finalidad de crear un triángulo entre el emisor de laser, modelo a escanear y detector de posicionamiento. De esta manera se mide la distancia existente utilizando los ángulos del triángulo generado, la **Figura 3** describe de manera breve el principio de triangulación.

Nube de puntos

Los autores (Rusinkiewicz & Levoy, 2000) define a la nube de puntos como el conjunto de vértices dentro de un sistema referencial de coordenadas 3D (x, y, z). Las coordenadas serán utilizadas para describir la ubicación de un punto superficial del modelo a escanear. A continuación, se presenta en la **Figura 4** un ejemplo de una nube de puntos de un cuerpo rectangular desde su parte superior.

Figura 4

Nube de puntos generada por el análisis de un escáner 3D sobre la superficie superior de un rectángulo, solo se puede apreciar la superficie en cuestión y la base.



Nota. Tomada de (Junior et al., 2008).

Posprocesado

Una vez que el escáner obtuvo la malla de puntos, es necesaria una interpretación de la misma para la reconstrucción completa de un modelo. Ya que el escáner analiza al

objeto desde distintos puntos o posiciones de escaneo, es necesario juntar todas las vistas dentro de un mismo marco referencial; el autor (Besl & McKay, 1992) define a este proceso como registro. Para realizar el posprocesado del modelo, se requiere del uso de modelos matemáticos generados que describen de una manera óptima las superficies del objeto. Los métodos más comunes para este proceso son mallado de polígonos, splines, trazos, etc.

Estado del arte

Estado del arte del CIM

El presente proyecto está enfocado al rediseño e implementación del Escáner 3D ESPEL, indexado al CIM como estación de escaneo 3D, haciendo uso de distintos componentes que integran un sistema de manufactura integrada por computadora CIM. Cumpliendo con la adquisición de datos necesarios, supervisión de eventos, ejecución de rutinas de escaneo y procesos necesarios para llevar a cabo el funcionamiento correcto del sistema optimizando tiempos de producción y reduciendo errores.

A continuación, se describen proyectos, artículos y usos actuales relacionados con el trabajo realizado; que posteriormente, servirán como criterio de análisis para posibles soluciones y alternativas de diseño. Esta serie de trabajos presentados son relacionados a tecnologías de escaneo 3D indexadas con manipuladores y otros elementos de hardware habituales de un CIM.

En la investigación: Diseño e Implementación de una Celda de Manufactura Robotizada, para la Réplica de Piezas 3D, mediante fresado en el Laboratorio de Robótica Industrial de la ESPE-EL (Acuña et al., 2014), presenta una propuesta de celda de manufactura robotizada que se encarga de obtener el modelo de una pieza a través de un escáner 3D Noomeo OptiNum, cuya función es digitalizar el objeto. A continuación, mediante el

uso del software NumiSoft inicia la etapa de posprocesado creando una nube o malla de puntos similar a la forma real, la información adquirida se puede utilizar en el software SolidWorks permitiendo al usuario revisar las superficies a detalle del sólido, seguido por una etapa de uso de MasterCam para la creación de trayectorias para realizar el mecanizado de la pieza.

Para la interpretación de las rutinas de mecanizado por el brazo robótico se utilizó el complemento CAM ROB de KUKA Sim Pro, encargado de generar las trayectorias para el robot en base al código G, como etapa final se realiza la ejecución del mecanizado usando el cabezal fresador obteniendo la réplica del modelo propuesto. Como solución para la digitalización de piezas se utilizó un escáner 3D de luz estructurada, cuya función de captura de superficies se realiza a través de la proyección de un patrón de luz utilizando un proyector sobre la pieza a analizar, la técnica a utilizar para el cálculo de profundidades y distancias es de triangulación. Se presenta en la **Figura 5** la celda de manufactura robotizada propuesta con cada uno de sus componentes enlistados.

Figura 5

Celda de manufactura robotizada para replicar piezas en 3D



Nota. Celda de manufactura robotizada para replicar piezas en 3D desarrollada en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPEL que consta de las partes 1. Brazo robótico KUKA

KR16 2. Cabezal de fresado 3. Mesa de trabajo 4. Escáner 3D de luz estructurada 5.

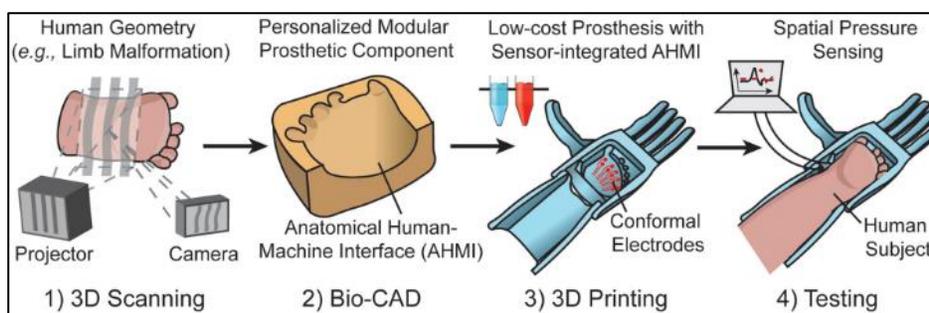
Ordenador Figura tomada de (Acuña et al., 2014)

En el trabajo se concluyó, a través de resultados de pruebas que el proceso de réplica de piezas no es totalmente exacto, debido a fallas durante el proceso de escaneo y en menor proporción durante el proceso de mecanizado; existe un error del 1.02% respecto a la pieza original, el proceso no es recomendado para replica de piezas de precisión. El mecanizado tuvo una tolerancia de ± 0.05 mm, mientras que el escaneo tuvo una variación mucho más significativa de ± 0.705 mm

El proyecto “Low-cost sensor-integrated 3D-printed personalized prosthetic hands for children with amniotic band syndrome: A case study in sensing pressure distribution on an anatomical human-machine interface (AHMI) using 3D-printed conformal electrode arrays” elaborado por (Tong et al., 2019) se basa en la producción de manos protésicas para niños con deformaciones debido al síndrome de bandas amnióticas, mediante el uso de la integración entre escaneo 3D e impresión 3D. En la **Figura 6** se describen los pasos a realizar durante el proyecto propuesto.

Figura 6

Elaboración de prótesis de manos usando técnicas de prototipado rápido y sistemas flexibles de manufactura asistida para computadora



Nota. Tomada de (Tong et al., 2019)

Primero se realiza un molde de resina de la extremidad del paciente con el fin de tener un modelo real fabricado de poliuretano que permite una fácil manipulación para el proceso de escaneo 3D, a continuación, se procede con la etapa de escaneo 3D del modelo en una estación de escaneo 3D SLS-2 HP de luz estructurada utilizando una calibración de mallado de 60mm obteniendo una nube de puntos de la extremidad.

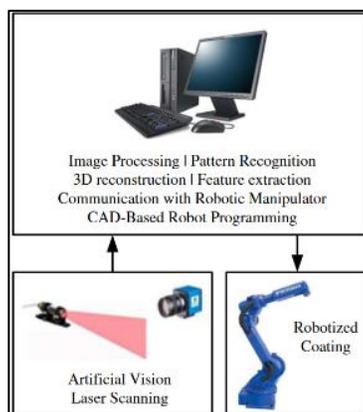
Como siguiente paso se realiza una optimización de parámetros de la nube de puntos, se utilizaron dos métricas distintas para la optimización y posprocesado: Relación de Superposición de Escaneo (SOR) y Métricas de Calidad Local con el fin de obtener un modelo más aproximado al real; estos métodos cubren toda la superficie del modelo de manera angular 0-360° utilizando un paso óptimo calculado de 0.45°. Después inicia la etapa del diseño asistido por computador CAD para la impresión de la prótesis, el software utilizado fue SOLIDWORKS y utilizando los datos del modelo digitalizado y datos de la base e-NABLE se procede a personalizar el espacio de la palma con el fin de obtener el juego necesario entre extremidad y prótesis. A continuación, inicia la etapa de impresión 3D e instrumentación de la prótesis para concluir con las respectivas pruebas sobre el desempeño de la prótesis con el paciente.

Se concluyó que el uso de la integración de métodos de prototipado rápido es una alternativa eficaz y precisa para la creación de prótesis de manos, se mejoró la calidad de la digitalización del modelo mediante la identificación de parámetros adecuados para el escaneo 3D dentro de las métricas de Relación de Superposición de Escaneo (SOR) y Métricas de Calidad Local permitieron optimizar el paso del modelo a escanear, la primera prueba se realizó con un paso angular de 1.7° por paso obteniendo un error de puntos sin escanear mayor al 17% una vez optimizados los valores mediante las métricas mencionadas se usó un paso de 0.47° obteniendo un error menor al 2%. Esta técnica permite tener un modelo más preciso de la extremidad y el uso de impresión 3D aumenta la posibilidad de personalización de la prótesis.

La publicación: “A low-cost laser scanning solution for flexible robotic cells: spray coating” de los autores (Ferreira et al., 2012) describe el desarrollo de una celda robótica flexible para pintura de superficies o cuerpos en una línea de producción pequeña. Presenta una arquitectura flexible que permite al usuario un sistema rápido y automatizado de comportamiento adaptable sin necesidad de la intervención humana. El concepto se basa en el uso de visión artificial y escaneo laser para identificar y distinguir distintas piezas de trabajo en la línea de producción. En la **Figura 7** se presenta la arquitectura utilizada para el proyecto, describiendo el flujo de trabajo y datos a lo largo de la ejecución del mismo.

Figura 7

Arquitectura del prototipo simplificada



Nota. Tomada de (Ferreira et al., 2012)

Se utiliza un escáner activo con principio de triangulación laser para reconstruir las piezas virtualmente asistido por un sistema de visión artificial usando una cámara DMK 31BU03 encargado de analizar la superficie y detectar zonas irregulares donde sea necesaria la optimización de parámetros de escaneo; la integración de este tipo de tecnología permite a la celda un comportamiento más predictivo y con mayor precisión. Una vez realizado el escaneo se genera una nube de puntos o malla tridimensional, el

autor propone el uso de un algoritmo de simplificación de malla de puntos consiguiendo un proceso más fluido.

A partir de la nube de puntos se realiza una reconstrucción del modelo, que, mediante la implementación de algoritmos de extracción de información basado en análisis de perfiles de piezas de trabajo por visión artificial, se reconoce el patrón a seguir para cubrir toda la superficie, tamaño, límites y posiciones. Con la información proporcionada un manipulador robótico ejecuta el proceso de “recubrimiento” con pintura.

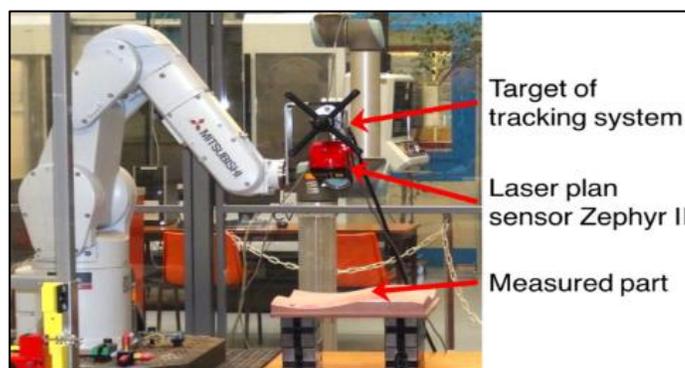
Se obtuvo como resultado en el proceso de escaneo un error bajo de 2.1% en el análisis de piezas de mayor tamaño (80x40) y en piezas pequeñas (50x30) un error de 1.1%. El uso de la visión artificial permitió al proyecta métodos de reconocimiento de piezas de trabajo con un error menor al 0.1% debido al aprendizaje de la inteligencia utilizada. El proyecto presenta una solución de bajo costo y completamente automatizada que permite la adaptación del robot a distintos entornos de trabajo o situaciones de manufactura, lo que significa que el robot se encuentra listo para trabajar en cualquier momento, con una línea de producción pequeña o reducida a simplemente un objeto, la configuración es sencilla y reduce la intervención de operadores por largos periodos de tiempo. Mediante las pruebas experimentales se determinó que el uso del prototipo también puede ser con otros fines industriales tales como manipulación, pick and place, inspección, etc.

En la publicación “Scanner path planning with the control of overlap for part inspection with an industrial robot” del autor (Phan et al., 2018) presenta la integración de un escáner 3D activo de triangulación Zephyr II y un brazo robótico Mitsubishi de seis ejes para la inspección automatizada de partes presentada en la **Figura 8**, se requiere conseguir una toma de rápida de decisiones en cuanto a la conformidad de un producto.

Se diseña un nuevo método de planificación de la ruta del escáner para la inspección de piezas.

Figura 8

Sistema de escaneo propuesto



Nota. Tomada de (Phan et al., 2018)

Para la optimización de rutas de escaneo se utilizaron algoritmos de Relación de superposición de escaneo (SOR) que permiten reconocer una superficie en 3D como un plano en 2D (estirando la superficie) y a partir de esto crear rutas de escaneo dirigidas hacia puntos críticos de la pieza a analizar, se puede obtener una mejor calidad del mallado o nube de puntos simplificada generada por el escáner optimizando la cobertura del láser del escáner.

Para el posprocesado de las nubes de puntos se utilizó el software ISOvScan, software que propone un método innovativo de escaneo en sinergia con un brazo robótico de la marca Mitsubishi. El software permite el reconocimiento de la superficie y recomienda los parámetros a utilizar desde dimensiones FOV hasta el rango admisible de pasos para la aplicación en concreto; el objetivo principal del algoritmo del software es incrementar la calidad de escaneo indistintamente del tiempo que toma su aplicación. Como resultado se obtuvieron rutinas que permiten un escaneo de mayor eficiencia, cubriendo todas las áreas del objeto usando distancias constantes y manteniendo un

control continuo de la orientación del escáner. Ya que el objetivo principal del proyecto es mejorar la calidad de escaneo en las pruebas realizada en modelos de 115x120 mm se generaron nubes con más de 1'629.604 puntos en promedio entre todas las pruebas registrando un ruido mínimo de ± 0.0015 mm; lo que convierte a esta propuesta en una solución considerable cuando se requiere aumentar la calidad de escaneo. Existe un problema al momento de recorrer zonas con muchas irregularidades ya que se genera una alta cantidad de ruido indeseado mayor a 0.061 mm por lo cual se recomienda mejorar los parámetros de SOR.

Usos de tecnología de escaneo 3D en la industria ecuatoriana

En la actualidad la industria ecuatoriana se encuentra en un proceso de actualización constante, por lo cual es habitual ver el uso de diversas tecnologías con el fin de cumplir con funciones específicas. El uso de escáneres 3D se ha vuelto habitual en diversas áreas de la industria, a continuación, se mencionan empresas que actualmente utilizan equipos de escaneo 3D:

- En el caso de la empresa SERTECPET S.A. se utiliza un escáner 3D de triangulación laser para analizar los efectos del alto caudal de operación en los distintos elementos que conforman los sistemas de bombeo hidráulico, con el fin de identificar zonas propensas a alteraciones en la geometría, esto es debido a que cada pozo en el que se trabaja tiene distintas condiciones de operación o propiedades por lo cual ciertos parámetros de diseño y fabricación de sistemas bombeo deben ser modificados.
- En la empresa CELE EP en HIDROAGOYAN el uso de escáneres 3D es muy importante ya que permite realizar un análisis profundo del impacto del flujo del agua sobre las turbinas que operan en la central, permitiendo realizar reparaciones o modificaciones de acuerdo con los resultados obtenidos

- En Ambato la empresa PLASTICAUCHO Industrial S.A la tecnología de escaneo 3D es utilizada para facilitar la creación de suelas para el calzado mediante la creación de moldes para suelas a partir de la malla de puntos generada por el dispositivo.

Estado del arte de tecnología de escaneo 3D indexada al CIM

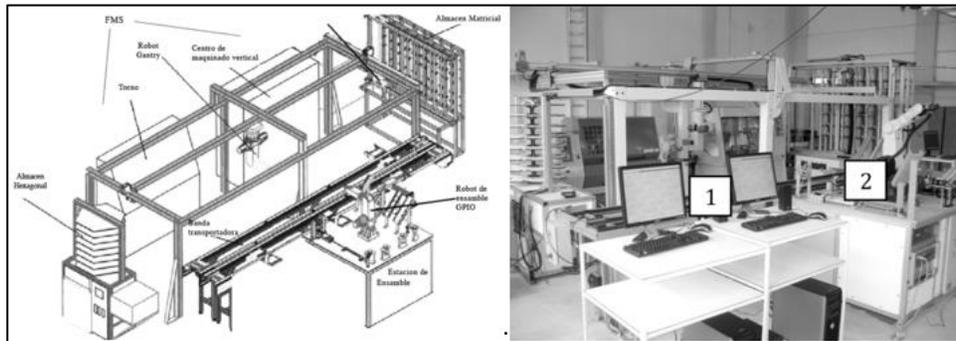
La indexación de un escáner 3D dentro de un CIM no ha sido implementada anteriormente, por lo que en esta investigación se muestra el primer proyecto de esta naturaleza, se utilizará como guía referencial para soluciones el estado del arte de sistemas CIM convencionales y de proyectos de indexación de tecnologías de visión artificial dentro de sistemas de manufactura integrada por computadora CIM.

En la investigación : Modelado de una Celda de Manufactura Integrada por Computadora (Velázquez et al., 2010) *en el* proyecto presentado consiste en el desarrollo de una celda de manufactura CIM mediante el uso de una metodología secuencial por pasos, primero se modela una celda de manufactura flexible con redes Petri seguido por la transformación del modelo obtenido a programación de hardware en bajo nivel.

En la **Figura 9** se presenta el sistema de manufactura integrada por computadora a modelar en el proyecto.

Figura 9

CIM propuesto para modelar en el proyecto consta de elementos de un FMS (torno, robot p $\acute{o$ rtico, centro de maquinado vertical, ASRS, robot GPIO, banda transportadora y almac \acute{e} n hexagonal.)



Nota. Las celdas de interés para el desarrollo del proyecto son (1) Banda transportadora y (2) Estación y robot de ensamble. Figura tomada de (Velázquez et al., 2010)

Las estaciones del CIM se encuentran controlados e intercomunicados mediante los PLC de marca SIEMENS S7-200 y 300 respectivamente; las estaciones se encuentran distribuidas en configuración tipo U. Para la comunicación se utilizan paquetes de cómputo de Simatic Step 7 para el PLC de la banda transportadora y Microwin S7 para la estación de ensamble; para la comunicación de los robots se utilizó el software Robcomm.

Para el diseño de la red Petri se dividió el proceso en secciones, siendo la primera la correspondiente a la banda transportadora, el objetivo principal es conseguir el modelo y análisis de la plataforma de e/s de la banda. La secuencia deseada es la alimentación del principio de la banda, detección de objeto e inicio de los motores que accionan la banda, tiene alternativas de operaciones y limitantes de acción Se realizó una programación en base a los estados lógicos de sensores a lo largo del sistema, se

utilizaron sensores capacitivos, fines de carrera, temporizadores y sensores de presencia; a la par con actuadores como motores, cadenas y cilindros.

Una vez realizadas las pruebas del sistema de manufactura se pudo evidenciar un comportamiento óptimo, respetando los tiempos establecidos en la programación realizada, se anexaron tablas de registro de marcas y en base a ello se indica la secuencia de disparos de transiciones de estados en el sistema, donde se puede evidenciar un desempeño satisfactorio por parte de la red Petri, no existieron detecciones falsas dentro del proceso tampoco medidas que detengan su ejecución, existieron problemas de velocidad de intercambio de datos debido a la complejidad de la red, se evidenciaron tiempos mayores a 7 segundos por lo cual se concluyó que el uso de una red Petri dentro de un CIM es una alternativa viable, presenta limitaciones en su implementación dentro de sistemas de manufactura complejos (superiores al tipo I) debido a que se realiza una red cableada de instalación compleja.

El proyecto: Estación de control de calidad por visión artificial para un centro de manufactura integrada por computador (CIM) del autor (Zambrano-Rey et al., 2007) presenta la implementación, construcción y validación de una estación indexada a un CIM para el control de calidad mediante visión artificial, encargada de inspeccionar y verificar el estado de piezas mecánicas en base a una plantilla preestablecida de una pieza patrón. La estación de control de calidad se encarga de analizar distintas métricas relacionadas a la metrología que garantizan una calidad óptima de la pieza, como: rectitud, redondez, perpendicularidad, angularidad, paralelismo y concetricidad.

El proceso a realizar por la estación consta de varias etapas, primero se realiza una etapa de captura, se encuentra centrado en tres aspectos importantes para obtener una imagen de calidad alta: Iluminación homogénea y sin saturación en puntos, sistemas ópticos óptimos, ya que estos pueden sufrir de distorsiones geométricas y la

cámara; Durante este proceso se obtienen fotografías del modelo a analizar desde distintos puntos de vista para permitir un barrido completo de la superficie.

La siguiente etapa es la de pre procesamiento, mediante la aplicación de algoritmos matemáticos se realiza el realce y mejoramiento de las características más importantes de la imagen original, en este trabajo se utilizaron técnicas de filtrado bilateral y de intervalo con dominio para evitar que se supriman detalles importantes como bordes o acabados. A continuación, se realiza una etapa de segmentación o umbralización, encargada de separar regiones de una imagen a partir de un análisis de histograma. Se encarga de trazar y extraer los bordes del objeto para su análisis mediante el uso de algoritmos de análisis e inspección.

Para su uso en el CIM se utilizó la plataforma de programación y comunicación COSIMIR CONTROL, que se encargan de proporcionar los controladores para las interfaces de comunicación, permite el uso de PROFIBUS, RS232, OPC, FILE I/O, TCP/IP y ODBC. De acuerdo a la topología de red del CIM se decidió por HTTP, de manera que solo sea necesario conectar el módulo con el concentrador y asignar una dirección IP válida dentro de la red; se utilizó programación C++.net para el sistema de visión artificial.

La ejecución de tareas dentro del CIM se basa en planes de proceso, es decir una secuencia de pasos establecidos por el usuario. Ya que el proyecto se basa en la integración de una estación de visión dentro de un CIM de distribución tipo U ya existente, la planeación de ejecución de pasos del sistema también permite integrar otras estaciones dentro del proceso a realizar. Se creó un HMI para la interacción con el usuario y parametrización del proceso haciendo que sea un sistema con cierto grado de flexibilidad. A continuación, en la **Figura 10** se presenta el HMI diseñado para el

proyecto donde se puede configurar número de mediciones, tolerancias, ubicación de la cámara de manera que el sistema se torna en una plataforma general para análisis.

Figura 10

HMI diseñado para la estación de control de calidad por visión artificial indexado a un CIM



Nota. Se presenta la ventana de usuario para la configuración de procesos de manufactura realizada en COSMIR CONTROL. Figura tomada de (Zambrano-Rey et al., 2007)

El sistema de control y monitoreo SCADA COSMIR CONTROL también presentado en la **Figura 10** permite al usuario una configuración más amplia de los parámetros de la estación a utilizar. Para las pruebas de la estación implementada en el CIM se utilizaron modelos cilíndricos de diferentes diámetros para ser medidos con distintos parámetros ingresados en la computadora central, en tres posiciones distintas de la cámara se presenta un error constante pero sumamente bajo todos menores al 0.009 mm lo que da a entender que el sistema de visión artificial se mantiene dentro del umbral de error sin afectar la detección de elementos en el modelo.

Los valores de las desviaciones son menores a un pixel y mayores a un pixel en menor proporción, con esto el sistema puede ajustarse para disminuir errores, aumentando la resolución de captura, procesamiento y segmentación de imágenes. Al implementar la estación dentro de un CIM ya existente se concluyó que la solución de tipo de sistema de manufactura integrada por computador más conveniente es el CIM tipo I

debido a su flexibilidad y tipo de tareas a realizar. El uso de ETHERNET con protocolos TCP/IP permitió a los desarrolladores obtener una red ágil, estable y con respuesta rápida.

En el trabajo: Desarrollo e Implementación de un Sistema de Visión Artificial Basado en Lenguajes de Uso Libre para un Sistema Seleccionador de Productos de un Centro Integrado de Manufactura (CIM) elaborado por los autores (Amaya-Zapata et al., 2016) se presenta el desarrollo de un sistema capaz de seleccionar objetos comandado por visión artificial, usando una cámara web Logitech de la mano de Python, trabaja utilizando las librerías de open CV. Su funcionamiento se basa en un posicionador de objetos, configurado por los desarrolladores para identificar colores RGB por la cámara web, que debe realizar el proceso de captura de imagen y posprocesado mediante el lenguaje del software. El sistema brinda la opción de informar al usuario el estado del modelo a analizar en cuanto a forma y colores.

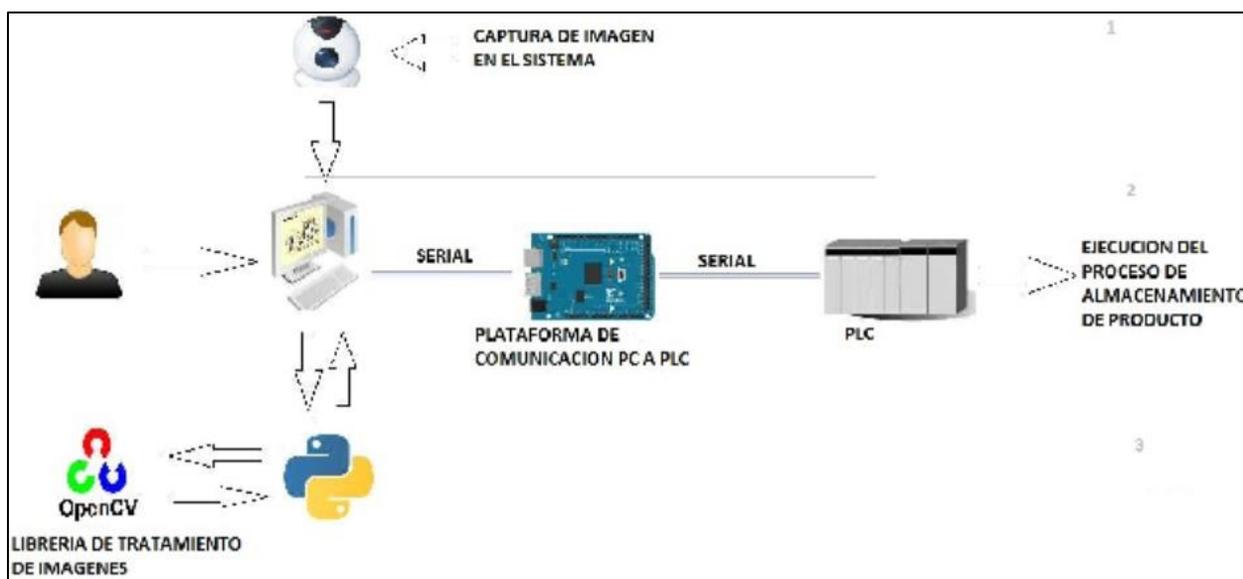
El clasificador utilizara como criterio de acción el color y forma del objeto, para esto se usa el software LabVIEW encargado de realizar los distintos filtros de procesamiento de imágenes del proceso y un HMI que permite al usuario ingresar parámetros de clasificación. El ordenador central trabaja de la mano con la cámara web, se utilizan protocolos de comunicación MQTT con Arduino nano y un PLC SIEMENS S7-1200. En la **Figura 11** se puede apreciar de mejor manera la arquitectura del sistema y el flujo de información

Para la programación se utilizó Python, lenguaje de alto nivel que destaca debido a su versatilidad y potencia. De la mano de la librería Open CV para el tratamiento de imágenes. El funcionamiento consta de distintas etapas, configuración donde el usuario se encarga de ordenar al sistema por medio del HMI y fijar parámetros de clasificación, etapa de visión donde por medio de la cámara física se captura el objeto a analiza, etapa

de reconocimiento las imágenes pasan por filtros y análisis de fotogramas para determinar las características y compararlas y por ultimo una etapa de clasificación mediante un sistema electroneumático se decide el orden de las piezas de acuerdo a sus características.

Figura 11

Arquitectura propuesta para el sistema de visión artificial indexado a un centro integrado de manufactura CIM



Nota. Tomada de (Amaya-Zapata et al., 2016)

El autor recomienda el uso de una comunicación sencilla como es ETHERNET TCP/IP dentro de un CIM del tipo I dentro de una distribución de estaciones lineal debido a la naturaleza del proceso a realizar, los protocolos de comunicación permitieron al usuario un tiempo de respuesta optimo con un tratamiento adecuado de la integridad de los datos, no existieron inconvenientes de tráfico alto de datos y se mantuvo una estabilidad aceptable del sistema. El lenguaje de uso libre permite al usuario un rango más amplio de opciones a la hora de configurar y programar un sistema de visión artificial.

Línea base

El presente proyecto, será desarrollado en el **laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga**. El laboratorio permite a los alumnos y docentes el desarrollo de actividades y prácticas ingenieriles relacionadas al campo de la manufactura.

Consta de distintos equipos para prácticas, el laboratorio también brinda la posibilidad del desarrollo de diversas aplicaciones con el uso de las máquinas como proyectos de titulación.

Para la implementación del presente proyecto es necesario conocer e identificar el estado actual de los equipos del laboratorio relacionados al proyecto a desarrollar.

Escáner 3D rotativo laser

Mediante el proyecto de titulación de (Chasiluisa & Tapia, 2016), se desarrolló un escáner 3D rotativo para el laboratorio, su funcionamiento es a partir de principios de triangulación mediante laser y usando una cámara web de 1280 x 720. El dispositivo es capaz de interpretar colores y formas obteniendo una resolución de 0.5mm. Su operación puede ser ejecutada en un ambiente entre 6 – 1200 luxes, pero su mejor desempeño se consiguió entre 100 – 120 luxes. Permite la digitalización de sólidos con alta precisión. A continuación, en la **Figura 12**, se presenta una imagen del escáner disponible en el laboratorio CNC. Es necesario tomar en cuenta que el escáner disponible en el laboratorio se utiliza como una máquina individual y para el presente proyecto es necesario el rediseño de ciertos parámetros del sistema tanto mecánico, como electrónico.

Figura 12

Escáner 3D rotativo con principio de triangulación Laser del laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPEL



Nota. Tomada de (Chasiluisa & Tapia, 2016)

Alternativas de solución

Una vez realizada la investigación teórica y del estado de arte actual de los trabajos relacionados al Rediseño e implementación del Escáner 3D ESPEL, indexado al CIM como estación de escaneo 3D, se logró identificar distintos tipos de aplicaciones, características técnicas, ventajas y desventajas tanto de los diferentes tipos de CIM y escáneres 3D.

Alternativa de solución para el CIM**Alternativa de solución 1.**

En la obra analizada en el estado del arte escrita por (Amaya-Zapata et al., 2016) se realiza la indexación de un sistema de control de calidad por visión artificial a un sistema de manufactura integrada por computadora, el autor propone una solución mediante un CIM tipo I de distribución lineal, que brinda al usuario un sistema una manufactura con ejecución de procesos independientemente del resto de estaciones sin la necesidad de realizar trabajos o tareas secuenciales entre estaciones, presenta una arquitectura centralizada en un ordenador enfocada en control y supervisión. El CIM presentado por el autor también permite al usuario una instalación sencilla con componentes disponibles en el mercado nacional.

Alternativa de solución 2.

Los autores (Zambrano-Rey et al., 2007) y (Velázquez et al., 2010) presentan una solución con una arquitectura basada en un CIM tipo I con una distribución de estaciones en configuración tipo U, presenta el mismo tipo de arquitectura, pero con la desventaja de que su instalación presenta un mayor nivel de complejidad y el espacio físico que este requiere.

Selección de alternativa de solución para el CIM

A continuación, se seleccionará la opción más viable entre las alternativas de solución para el CIM, el proceso se basa en criterios que aseguran una implementación de un sistema de manufactura integrada por computador óptimo para el proyecto a desarrollar. Los criterios a considerar para la selección son:

- Instalación sencilla
- Bajo costo
- Disponibilidad de componentes
- Espacio físico para montaje

La escala de evaluación a utilizar es con calificaciones numéricas del 1 al 5 siendo 1 Insatisfactorio, 2 Normal, 3 Bueno, 4 Muy bueno y 5 Excelente. En la **Tabla 1**, se presenta el proceso de selección de alternativa para el CIM.

Tabla 1

Selección de alternativa de solución para el desarrollo del CIM

Criterio a evaluar	Alternativa de solución 1	Alternativa de solución 2
Instalación sencilla	5	3
Bajo costo	4	3
Disponibilidad de componentes	5	4
Espacio físico para montaje	5	2
Total	19	12

Nota. En la tabla se evalúan los criterios anteriormente mencionados y se suma los valores para obtener un total y la mejor alternativa de solución.

En la **Tabla 1** se aprecia la alternativa de solución que obtuvo el mayor puntaje total, la alternativa numero 1 es la mejor opcionada para el proyecto, propone un CIM de tipo I con una distribución de configuración lineal, presenta una instalación sencilla, bajo costo de implementación, con componentes disponibles en el mercado nacional y de tamaño compacto para su implementación en el laboratorio de control numérico CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPEL.

Alternativas de solución para el Escáner 3D

Debido a que el presente es un proyecto de rediseño, las alternativas de solución para el escáner 3D serán en base a los dispositivos de comunicación a utilizar dentro del CIM mas no del tipo de escáner. En las obras realizadas por (Acuña et al., 2014), (Tong et al., 2019) y (Phan et al., 2018) el escáner que brinda el mayor número de prestaciones en cuanto a precisión y calidad de escaneo son los escáneres activos con principio de triangulación por láser, esta tecnología es la misma que se implementó en el proyecto a rediseñar, originalmente realizado por (Chasiluisa & Tapia, 2016).

Alternativa de solución 1.

En base a lo planteado por el autor (Zambrano-Rey et al., 2007) el uso de un protocolo de comunicación basado en ETHERNET TCP/IP y programación en C++.net presenta un tipo de solución factible para la indexación del escáner 3D a un CIM de tipo. La programación se basa en un lenguaje de uso sencillo y muy intuitivo para el usuario como es C++, un problema existente es la poca flexibilidad que brinda al usuario al momento de desarrollar nuevas aplicaciones.

Alternativa de solución 2

El autor (Amaya-Zapata et al., 2016) presenta una alternativa de solución muy interesante, donde mediante la implementación de un controlador central Raspberry Pi y el uso del lenguaje de alto nivel Python y la librería OPEN CV que es exclusiva para el procesamiento de imágenes, se desarrolla la indexación entre un sistema de escaneo y un CIM, para la comunicación se utilizaron protocolos MQTT junto con un microcontrolador Arduino Nano para el envío y recepción de datos desde el ordenador central. Esta arquitectura presenta una flexibilidad muy amplia ya que el software de desarrollo libre brinda al desarrollador una amplia gama de funciones y soluciones en cuanto a procesamiento de imágenes y tratamiento de datos, facilitando el proceso de su indexación en el CIM.

Selección de alternativa de solución para el Escáner 3D

A continuación, se seleccionará la opción más viable entre las alternativas de solución para el CIM, el proceso se basa en criterios que aseguran una implementación de un sistema de manufactura integrada por computador óptimo para el proyecto a desarrollar. Los criterios a considerar para la selección son:

- Facilidad de programación
- Bajo costo
- Disponibilidad de componentes
- Versatilidad del sistema

La escala de evaluación a utilizar es con calificaciones numéricas del 1 al 5 siendo 1 Insatisfactorio, 2 Normal, 3 Bueno, 4 Muy bueno y 5 Excelente. En la tabla a continuación, se presenta el proceso de selección de alternativa para el Escáner 3D.

Tabla 2

Selección de alternativa de solución para el desarrollo del Escáner 3D

Criterio a evaluar	Alternativa de solución 1	Alternativa de solución 2
Facilidad de programación	5	4
Bajo costo	2	5
Disponibilidad de componentes	4	5
Versatilidad del sistema	3	5
Total	14	19

Nota. En la tabla se evalúan los criterios anteriormente mencionados y se suma los valores para obtener un total y la mejor alternativa de solución.

En la **Tabla 2** se aprecia la alternativa de solución que obtuvo el mayor puntaje total, la alternativa número 2 ya que proporciona una mayor flexibilidad y brinda al usuario un entorno de programación mucho más completo en comparación con el resto. La comunicación utilizada en esta alternativa es de fácil implementación y de alto nivel de prestaciones para el usuario.

Parámetros de diseño

Tomando en cuenta el análisis de la línea base, se desarrolló el proyecto y las alternativas de solución más viables tanto para el escáner 3D y el sistema de manufactura integrada por computadora CIM se procede a establecer los parámetros de diseño para el desarrollo del proyecto:

- Ya que el sistema de manufactura integrada por computador es de tipo I con un robot manipulador para la distribución de piezas entre estaciones, se propone el uso de estructuras abiertas sin barreras para mejorar la accesibilidad del manipulador.
- Se propone el uso de perfiles de aluminio para las estructuras debido a su rigidez, propiedades y costo razonable.

- Se propone la implementación de un área de mesa de escaneo de 300x900 mm para facilitar la accesibilidad del manipulador en la estación de escaneo.
- Para garantizar el envío y recepción de datos durante el proceso, la interacción entre estación de escaneo 3D y CIM se implementa los módulos de comunicación.
- Se utiliza software libre especializado en tratamiento y procesamiento digital de imágenes, garantizando beneficios de adquisición y aprovechando sus características técnicas para el desarrollo de tecnologías.

Capítulo II

Diseño y selección de componentes

Selección de componentes mecatrónicos

Una vez realizados los análisis de propuestas de diseño para el proyecto, se procede a elaborar la selección de componentes a utilizar para su implementación. Para la selección de componentes se procede a dividir al proyecto en distintas etapas: controlador, protocolo de comunicación, sistema embebido para la comunicación y lenguaje de programación.

Para la selección se utilizará una escala de evaluación con calificaciones numéricas del 1 al 5 siendo: 1 Insatisfactorio, 2 Normal, 3 Bueno, 4 Muy bueno y 5 Excelente.

Selección de controlador

La etapa principal a tomar en cuenta es la del controlador central del escáner, es el encargado de accionar los actuadores y gestionar las señales emitidas por los sensores de ser necesario. Ya que el proyecto se basa en el rediseño de un trabajo de titulación realizado anteriormente, es necesaria la actualización del controlador principal para acoplar al sistema a dentro de un CIM. Los aspectos principales a buscar en un controlador son escalabilidad, estabilidad, compatibilidad, disponibilidad en el mercado, facilidad de programación y robustez.

Alternativa 1: Los autores (Amaya, Zapata et al., 2016) propone el uso de un controlador Raspberry Pi 3 en adelante con RAM mayor a 2 Gb para el desarrollo de un sistema de visión artificial, permitiendo la implementación del sistema en un CIM. Dentro de los resultados del trabajo mencionado, se puede apreciar una alta escalabilidad ya que permite al usuario la capacidad de ampliación del sistema con el fin de satisfacer necesidades a futuro gracias a las altas prestaciones del controlador; debido a la capacidad de procesamiento el sistema se mantuvo estable ante perturbaciones externas lo que muestra un alto nivel de robustez. Los controladores utilizados se

encuentran fácilmente en el mercado, la compatibilidad es alta ya que son plataformas de uso libre. Al ser Raspberry un ordenador, la programación del mismo es muy versátil dando al usuario la posibilidad de acceder a distintos recursos o lenguajes. En el caso de este proyecto se utilizó Python.

Alternativa 2: En el desarrollo de un escáner 3D, los autores (Chasiluisa & Tapia, 2016) proponen el uso de un controlador Raspberry Pi 2 con 1 Gb de RAM. En la tesis se evidenció un desempeño aceptable, su escalabilidad es sumamente baja debido a la limitación del controlador por su capacidad de RAM, presenta una robustez alta ya que el resultado final de los escaneos realizados era muy aproximado al modelo original sin verse afectado por factores externos. De la misma manera que se mencionó en la alternativa 1 son dispositivos disponibles en el mercado y alta compatibilidad.

Alternativa 3: Debido a la complejidad del uso de sistemas operativos basados en Linux, es necesario considerar un sistema operativo familiar para el usuario como alternativa para la realización del proyecto. Una PC permite al usuario una gran cantidad de prestaciones, su versatilidad es su punto más fuerte; debido a su uso constante por muchos usuarios su disponibilidad es sumamente elevada, de la misma manera permite una mayor escalabilidad y compatibilidad con dispositivos. Esta alternativa es considerada también debido a que el escáner original está desarrollado en Python 2.7.8, versión que ya no tiene soporte en la actualidad; mediante el uso de una PC la actualización de versión es más sencilla de llevar a cabo, con el fin de trabajar asegurar la compatibilidad con bibliotecas de comunicación actuales.

A continuación, en la **Tabla 3** se realiza la selección de controlador utilizando el método de criterios ponderados.

Tabla 3

Selección de controlador por criterios ponderados

		Controlador		
		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Criterios De Evaluación	Controlador	Raspberry Pi 3+	Raspberry Pi 2	PC
		Escalabilidad	5	2
	Estabilidad	5	5	5
	Compatibilidad	5	2	5
	Disponibilidad en el mercado	4	3	5
	Facilidad de programación	4	3	5
	Robustez	5	5	5
	Total	28	18	30

Nota. Se evalúan los criterios anteriormente mencionados y se suma los valores para obtener un total para escoger el controlador apropiado.

Una vez realizada la selección de controlador por el método de criterios ponderados se obtuvo como mejor opción el uso de una PC, ya que este permite ampliar el nivel de escalabilidad del sistema, tiene un procesamiento superior a las otras alternativas y al ser de uso muy común su soporte, disponibilidad y compatibilidad es mayor.

Selección de protocolo de comunicación

Para conseguir indexar el escáner 3D dentro de un CIM como estación de escaneo, es imperativo el uso de comunicación entre el ordenador central y escáner 3D. Los aspectos a

tomar en cuenta para la selección de un protocolo de comunicación son: facilidad de implementación, tráfico de datos, interferencia por ruido, compatibilidad y mantenimiento.

Alternativa 1: Los autores (Zambrano-Rey et al., 2007) proponen en su trabajo la implementación de un protocolo de comunicación basado en HTTP, se evidenció un sistema de fácil implementación y mantenimiento, no es propenso al ruido y con un tráfico de datos que depende directamente de los equipos utilizados como repetidores de señal o Access Points. Su costo de implementación depende directamente del tipo de aplicación, en el caso del presente proyecto es un costo relativamente alto debido al uso de varias estaciones y la necesidad de un flujo rápido de grandes cantidades de datos. Debido a que es una tecnología usada en la actualidad su compatibilidad con lenguajes de programación es alta.

Alternativa 2: En su proyecto, los autores (Amaya-Zapata et al., 2016) proponen el uso de un protocolo MQTT, en los resultados del trabajo se destaca la velocidad de la conexión y la gestión óptima de datos a pesar del tráfico alto de información, el porcentaje de error es mínimo 2% lo que garantiza un sistema robusto y estable. La implementación de este tipo de comunicación es económica para el usuario, presenta ciertos desafíos a la hora de configurar y su mantenimiento es sencillo. La compatibilidad es muy amplia debido al uso constante de este protocolo en aplicaciones de IoT.

Alternativa 3: Los autores (Velázquez et al., 2010) utilizaron una red Petri complementada por cableado y comunicaciones seriales. El proyecto presentó un comportamiento rápido con bajo nivel de errores, su implementación es costosa y complicada debido al alto número de nodos físicos existentes dentro del sistema. El mantenimiento tiene un nivel de complejidad alto debido al cableado, este tipo de

tecnología es utilizada desde 1960 lo que hace que su compatibilidad sea mínima con las tecnologías actuales.

A continuación, en la **Tabla 4** se realiza la selección de protocolo de comunicación utilizando el método de criterios ponderados.

Tabla 4

Selección de protocolo de comunicación por criterios ponderados

		Protocolos de comunicación		
		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Criterios De Evaluación	Controlador			
		HTTP	MQTT	Cableado y serial
	Facilidad de implementación	5	4	2
	Soporta tráfico de datos	3	5	5
	Interferencia por ruido	4	5	5
	Compatibilidad	5	5	1
	Mantenimiento	4	5	1
	Total	21	24	14

Nota. Se evalúan los criterios anteriormente mencionados y se suma los valores para obtener un total para escoger los protocolos óptimos para la comunicación.

Una vez realizada la selección de protocolos de comunicación por el método de criterios ponderados se obtuvo como mejor opción el uso de MQTT, este tipo de protocolo presenta ventajas para el uso en un CIM debido a su versatilidad y compatibilidad con tecnologías actuales.

Selección de sistema para la comunicación

El uso de un sistema es necesario para la aplicación de los protocolos de comunicación entre la estación y ordenador central. En el presente proyecto se requiere una comunicación constante con el fin de cumplir con las ordenes enviadas por el ordenador central del sistema de manufactura integrada. El escáner 3D presenta distintas funciones y parámetros de seteo para su correcto funcionamiento por lo cual se limitará su rango de escaneo a modelos no mayores a 10 cm, esto es debido a la alta cantidad de datos que se requiere enviar para la configuración completa del escáner y el peso de los mismos; haciendo necesario el uso de controladores mucho más potentes, costosos, con baja compatibilidad y no disponibles en el mercado nacional. Los criterios utilizados para la selección del sistema embebido de comunicación son la compatibilidad con diversos lenguajes de programación, entorno de programación, disponibilidad y capacidad de procesamiento.

Alternativa 1: Los autores (Zambrano-Rey et al., 2007) proponen en su trabajo el uso de un Arduino nano como intermediario entre la estación de visión artificial y ordenador central. No presenta complicaciones en su implementación debido a que el flujo de datos en el proyecto es mínimo. Un Arduino presenta compatibilidad con diversos lenguajes de programación en un IDE sencillo de comprender para el usuario, su mayor deficiencia es su limitada capacidad de procesamiento.

Alternativa 2: En su proyecto, el autor (Amaya-Zapata et al., 2016) propone el uso de una ESP-32 para cumplir el papel de gestor de comunicación. En este proyecto se puede evidenciar un alto tráfico de datos durante la ejecución de procesos obteniendo resultados favorables lo que demuestra la capacidad alta de procesamiento de datos del sistema embebido, su entorno de programación es el mismo de Arduino lo que brinda una ventaja más al ESP-32, el uso de este tipo de sistema embebido es sumamente

popular en la actualidad lo que hace que su compatibilidad sea muy amplia en cuanto a lenguajes de programación.

Alternativa 3: Debido a que el controlador escogido en la **Tabla 3** es una PC es necesario considerarlo como una alternativa viable para la implementación de la comunicación, debido a que sus prestaciones son mucho más altas en comparación al resto de dispositivos.

A continuación, en la **Tabla 5** se realizará la selección de sistema para la comunicación utilizando el método de criterios ponderados.

Tabla 5

Selección de sistema para la comunicación por criterios ponderados

		Sistema para comunicación		
		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Criterios De Evaluación	Controlador	Arduino Nano	ESP-32	PC
	Compatibilidad con lenguajes de programación		5	5
Entorno de programación		4	4	4
Disponibilidad en el mercado		4	4	5
Capacidad de procesamiento		1	3	5
Total		14	16	19

Nota. Se evalúan los criterios anteriormente mencionados y se suma los valores para obtener un total para escoger el sistema embebido para comunicación.

Una vez realizada la selección de sistema para la comunicación por el método de criterios ponderados se obtuvo como mejor opción el uso de la PC debido a sus prestaciones que son una ventaja frente al resto y con el fin de optimizar los recursos del proyecto.

Selección de lenguaje de programación

Una vez realizada la selección correcta de los elementos pertenecientes a controlador, protocolos de comunicación y sistema embebido para comunicación se procede a la elección de la mejor opción para el lenguaje de programación. En las anteriores selecciones se obtuvo como resultado el uso de una PC como controlador del proyecto, el protocolo de comunicación será mediante MQTT utilizando las funciones de la PC como gestor para la comunicación entre la estación y ordenador central. El uso de protocolos MQTT está en auge en la actualidad debido a la facilidad de implementación, el uso de IoT y la compatibilidad con varios lenguajes de programación.

Alternativa 1: Los autores (Zambrano-Rey et al., 2007) proponen en su trabajo el uso de C++.net como lenguaje de programación. Se trata de un lenguaje de programación de licencia libre que permite la implementación de protocolos MQTT mediante el uso de la biblioteca PAHO, el lenguaje de programación basado en C++ permite la creación de interfaces humano máquina con el problema de que tiene una muy limitada personalización de las mismas. La librería para el procesamiento y adquisición de imágenes de C++, Armadillo C++ es una herramienta útil con ciertas deficiencias en cuanto a la flexibilidad de parámetros de configuración.

Alternativa 2: En su proyecto, los autores (Amaya-Zapata et al., 2016) propone el uso del lenguaje Python, es un lenguaje potente de licencia libre. De la misma manera permite la implementación de protocolos MQTT mediante el uso de la librería PAHO, la creación de HMI mediante el uso de diversas bibliotecas graficas permitiendo al usuario

una gran versatilidad al momento de diseñar interfaces. Para la implementación de algoritmos de adquisición de imágenes y procesamiento digital Python dispone de la biblioteca OpenCV de código abierto que brinda al usuario una gran versatilidad y flexibilidad en cuanto a parámetros de configuración para las imágenes a procesar.

A continuación, en la **Tabla 6** se realizará la selección de lenguaje de programación utilizando el método de criterios ponderados.

Tabla 6

Selección de lenguaje de programación por criterios ponderados

		Lenguaje de programación	
		Alternativa 1	Alternativa 2
Criterios De Evaluación	Controlador	C++.NET	Python
		Licencia libre	5
	Creación de HMI	2	4
	Bibliotecas para MQTT	5	5
	Bibliotecas para procesamiento de imágenes	2	5
	Total	14	19

Nota. Se evalúan los criterios anteriormente mencionados y se suma los valores para obtener un total para escoger el lenguaje de programación adecuado.

Una vez realizada la selección del lenguaje de programación, la alternativa más viable para la implementación es Python, este lenguaje presenta una gran cantidad de prestaciones para el usuario y alta potencia; dispone de bibliotecas dedicadas exclusivamente para el uso de MQTT y procesamiento de imágenes.

Alternativas para el diseño mecánico

El diseño mecánico de la estación se divide en dos partes, mesa de trabajo y estructura del escáner. A continuación, se realiza una selección de alternativas mediante criterios ponderados para cada parte de la estación mencionada.

Selección para material para la mesa de trabajo

Como se pudo evidenciar en los trabajos de (Amaya-Zapata et al., 2016; Velázquez et al., 2010; Zambrano-Rey et al., 2007) un sistema de manufactura integrada por computadora se compone por estaciones y un manipulador, cada una de las estaciones deben tener una mesa con un área de fácil acceso para el manipulador. Debido a la falta de información dentro del estado del arte acerca del diseño de las mesas de trabajo, en el presente apartado del proyecto se proponen alternativas para la fabricación de la mesa de trabajo, como primera etapa se analizará el material de fabricación. Para los criterios de selección del material se tomará en cuenta: costo bajo de implementación, facilidad de ensamblaje, estética, robustez de estructura y mantenimiento.

Alternativa 1: Realizar la mesa de trabajo con madera, presenta una alternativa económica, liviana y de fácil ensamble; la madera presenta un mantenimiento complejo.

Alternativa 2: Realizar la mesa de trabajo con metal, es una estructura más robusta, de fácil mantenimiento y con mejor apariencia, con un costo más elevado y mayor grado de dificultad de ensamble.

Alternativa 3: Estructura metálica y superficie de madera, aprovecha la robustez del metal e implementa madera para la superficie superior permitiendo disminuir costos, mejor apariencia y un ensamble medianamente sencillo. A continuación, en la **Tabla 7** se realizará la selección de proceso de manufactura utilizando el método de criterios ponderados.

Tabla 7

Selección de material para mesa de trabajo por criterios ponderados

		Material para la mesa de trabajo		
		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Controlador	Criterios De Evaluación	Madera	Metal	Estructura de metal y superficie de madera
		Costo	5	3
	Facilidad de ensamblaje	5	3	4
	Estética	3	4	5
	Robustez de estructura	2	5	4
	Mantenimiento	2	4	4
	Total	17	19	21

Nota. Se evalúan los criterios anteriormente mencionados y se suma los valores para obtener un total para escoger el material para la fabricación de la mesa de trabajo.

Mediante la aplicación de selección por criterios ponderados se determinó que la opción más recomendada para los materiales de la mesa de trabajo son estructura de metal con superficie de madera. Esto permite el diseño de una mesa de trabajo con cualidades de robustez y estética, con un fácil ensamblaje y de mantenimiento sencillo.

Selección de material de impresión para la fabricación de piezas en la estructura

Debido a que el proyecto se trata de un rediseño de una tesis anteriormente implementada se requiere del intercambio de piezas que no se encuentran en estado optimo. Los autores (Chasiluisa & Tapia, 2016) propusieron en el proyecto original que las piezas a implementar en el prototipo sean impresiones 3D, por lo cual se utilizará el

mismo tipo de fabricación para las piezas a intercambiar. Para las piezas es necesario tomar en cuenta distintos criterios, como resistencia a golpes y costos de implementación. A continuación, se presentan alternativas de materiales para elaborar la carcasa.

Alternativa 1: En este caso se realizará el análisis con PLA, uno de los materiales más comunes en el mercado actual de impresión 3D, a continuación, en la **Tabla 8** se muestran las propiedades mecánicas del material presentado por los autores (Hodžić et al., 2020); este material es el que comúnmente se utiliza para las impresoras 3D.

Tabla 8

Propiedades mecánicas del ácido poliláctico PLA

Propiedades Mecánicas	Valor típico
Módulo de elasticidad a la tracción	2346.5 MPa
Esfuerzo de tracción a la deformación	49.5 MPa
Esfuerzo de tracción a la rotura	45.6 MPa
Alargamiento a la deformación	3.3%
Alargamiento a la rotura	5.2%
Resistencia a la flexión	103 MPa
Módulo de flexión	3150 MPa

Nota. En la tabla tomada de los autores (Hodžić et al., 2020) se muestran las propiedades mecánicas del PLA con el fin de ser tomadas en cuenta para la elaboración de selección por criterios ponderados.

Alternativa 2: Entre las opciones de material de impresión más utilizadas, también se encuentra el ABS. A continuación, en la **Tabla 9** se presentan las propiedades mecánicas del material, presentadas por (Hodžić et al., 2020).

Tabla 9*Propiedades mecánicas del ABS*

Propiedades Mecánicas	Valor típico
Módulo de elasticidad a la tracción	1681.5 MPa
Esfuerzo de tracción a la deformación	39 MPa
Esfuerzo de tracción a la rotura	33.9 MPa
Alargamiento a la deformación	3.5%
Alargamiento a la rotura	4.8%
Resistencia a la flexión	70.5 MPa
Módulo de flexión	2070 MPa

Nota. En la tabla tomada de los autores (Hodžić et al., 2020) se muestran las propiedades mecánicas del ABS con el fin de ser tomadas en cuenta para la elaboración de selección por criterios ponderados.

A continuación, en la **Tabla 10** se realizará la selección de material de impresión 3D para la estructura utilizando el método de criterios ponderados.

Tabla 10*Selección de material de impresión 3D para la estructura por criterios ponderados*

		Material de impresión 3D	
		Alternativa 1	Alternativa 2
Controlador Criterios De Evaluación		PLA	ABS
	Resistencia a la flexión	5	3
	Módulo de flexión	4	5
	Disponibilidad en el mercado	5	4
	Costo	4	5
	Total	18	17

Nota Se evalúan los criterios anteriormente mencionados y se suma los valores para obtener un total para escoger el material de impresión 3D para las piezas de la estructura del escáner 3D.

Una vez realizado el proceso de selección de alternativa se puede apreciar que el material más conveniente es el PLA esto debido a su alta resistencia a la flexión, lo que indica que es un material más resistente a cargas del tipo axial y normal, su módulo de flexión no es muy elevado lo que indica una baja flexibilidad, pero mayor resistencia, este tipo de ventajas resultan beneficiosas al momento de crear una estructura para un dispositivo.

Diseño Mecatrónico

Diseño Mecánico

De la misma manera que el proyecto original, desarrollado por (Chasiluisa & Tapia, 2016) para el desarrollo de la estación de escaneo, se parte de la estructura del escáner open source Cyclop BQ, su estructura se basa en dos partes principales, una base fija que se encarga de portar los elementos: periféricos, controlador y dispositivos de haz de laser; y una parte móvil como mesa giratoria, donde el elemento a escanear es colocado, el giro se realiza mediante la acción de un motor a pasos Nema 17.

Ya que se trata de un rediseño se partirá del prototipo original implementado por (Chasiluisa & Tapia, 2016) en la **Tabla 10** se realizó la selección de material de impresión para piezas a intercambiar. Los elementos secundarios como elementos de fijación, varillas roscadas y rodamientos, serán los mismos que se consiguen en el mercado local. En el **Anexo A** se enlista los elementos primarios y secundarios que componen la estación de escaneo.

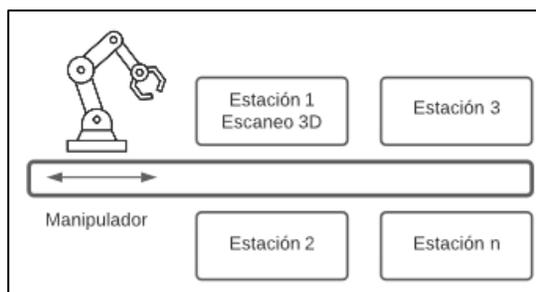
La mesa de trabajo para la estación de escaneo se situará como primera estación dentro del CIM desarrollado, esto debido al espacio necesario que debe existir entre la mesa de

escaneo y el fondo, con el fin de evitar colisión del haz de laser sobre superficies indeseadas ajenas al cuerpo a analizar, lo cual provoca lecturas erróneas por parte del escáner.

Previamente en la **Tabla 1** se realizó la selección de alternativa de solución para el desarrollo del CIM, donde la alternativa más opcionada es un CIM tipo 1 de distribución lineal, en la figura a continuación se presenta el diseño del CIM con la estación de escaneo.

Figura 13

Diseño del CIM tipo 1 en configuración lineal con estación de escaneo indexada



Diseño Electrónico

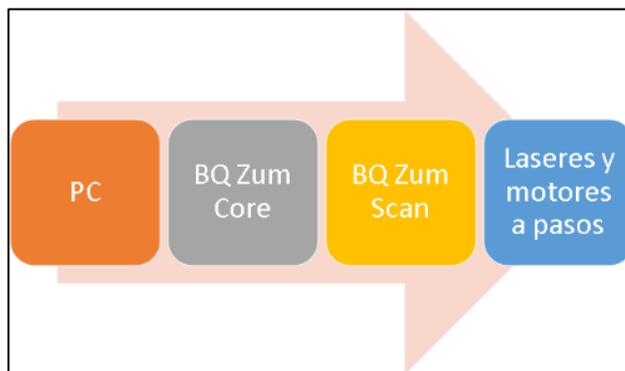
Mediante la selección de alternativas para el controlador en la **Tabla 3** se determinó que, con el fin de conseguir una mayor escalabilidad, compatibilidad y fluidez de ejecución es necesario la actualización de controlador electrónico por una PC. El uso de una PC no requiere el conocimiento de un sistema operativo ajeno. En el **Anexo B** se adjuntan las especificaciones técnicas del controlador.

El prototipo de escáner 3D requiere del uso de un controlador adicional para manejar los actuadores que intervienen, láseres y motor; para lo cual se utilizará una placa BQ ZUM Core acoplado un shield BQ ZUM Scan para control de los elementos mencionados.

Una vez definidos los componentes para la electrónica del escáner, la etapa de control del sistema independiente se presenta en la **Figura 14**.

Figura 14

Orden jerárquico de la etapa de control del escáner 3D

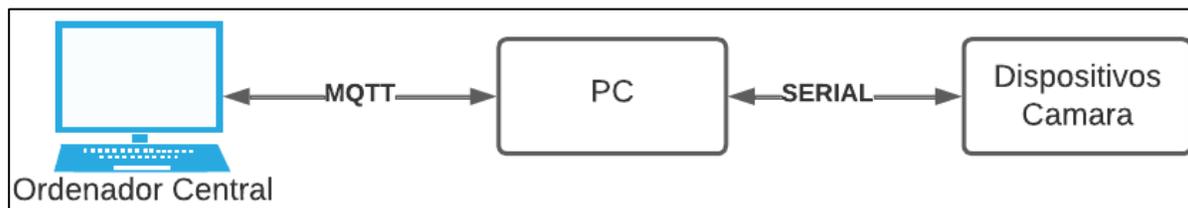


Para la selección de los elementos como láseres, y camera se utilizaron los resultados obtenidos en la etapa de selección de componentes de (Chasiluisa & Tapia, 2016), se adjuntan las tablas el **Anexo C** del proyecto.

Para la etapa de comunicación mediante el uso de selección por criterios ponderados en la **Tabla 5** se definió que la mejor opción para una comunicación óptima es el uso de la PC usada de controlador, esto es con el fin de evitar la implementación de bibliotecas ajenas enfocadas en comunicación dentro del script principal del escáner. Uno de los principales problemas al momento de diseñar la comunicación del sistema fue la versión de Python en la cual el proyecto original fue desarrollada, Python 2.7.8, versión desactualizada que ya no tiene soporte actual. La solución presentada en la etapa de selección de alternativas es el uso de un gestor intermedio para la comunicación entre el ordenador central y el escáner. Por lo tanto, la comunicación bilateral entre el escáner y el ordenador se ejecutará mediante la aplicación de protocolos MQTT. En la figura a continuación, se muestra las etapas de comunicación para la ejecución de rutinas en el CIM.

Figura 15

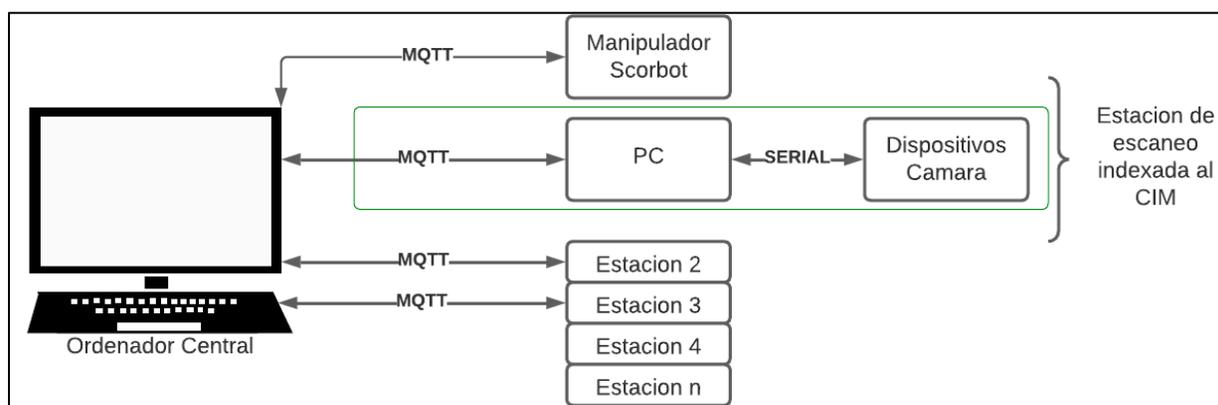
Proceso de intercambio de datos y comunicación escáner/ordenador central



Como se expuso en el estado de arte y marco teórico, un CIM se conforma de un ordenador central, un manipulador y n número de estaciones (Groover, 2007); por lo cual en la figura a continuación, se presenta la comunicación del escáner indexada en el CIM como una estación de escaneo.

Figura 16

Sistema de manufactura integrada por computadora con estación de escaneo indexada al CIM y n estaciones



Diseño de aplicación

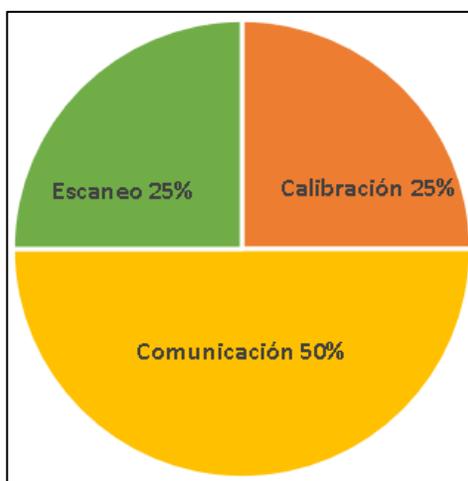
Como se definió anteriormente, es necesaria la implementación de un gestor para la comunicación entre la estación el ordenador central del CIM, para la implementación y desarrollo del escáner se utilizó Python gracias a las prestaciones presentadas en la **Tabla 6**. Para la indexación del escáner en un sistema de manufactura integrada por

computador es necesario utilizar las funciones desarrolladas previamente para el sistema en la tesis realizada por (Chasiluisa & Tapia, 2016), la comunicación será la parte clave para conseguir el desarrollo de una estación de escaneo.

Debido al alto tráfico de datos que existe durante la ejecución del proceso de escaneo y la necesidad de la intervención del humano para la configuración de parámetros previo al proceso, los valores de los parámetros de la cámara estarán previamente cargados dentro del sistema con el fin de no sobrecargar el sistema con datos. En base a esto se presentan las tres partes principales de la aplicación a desarrollar en la figura a continuación, priorizando cada una de las etapas de acuerdo a su importancia para la indexación correcta dentro de un sistema de manufactura integrada por computador CIM.

Figura 17

Componentes básicos de la aplicación ordenados de acuerdo a su importancia para la implementación en un CIM



Como se puede apreciar en la **Figura 17**, la parte crucial para desarrollar una estación de escaneo en un CIM es la comunicación, esta parte es la que se encargará de interconectar el sistema de escaneo con el ordenador central, mediante la implementación de un gestor intermedio como se explicó en la parte de diseño electrónico. Esta parte también se encarga de

interpretar los comandos enviados por el ordenador central e identificar el estado de la estación, por lo cual es necesaria una comunicación bilateral.

La segunda parte se encarga de ejecutar las rutinas de escaneo, en esta parte mediante la ejecución del algoritmo de triangulación laser, se genera una nube de puntos similar al solido a analizar; por último, se tiene la parte de calibración, como se estableció anteriormente con el fin de evitar el tráfico alto de datos los parámetros de calibración estarán pre cargados dentro del sistema. Cabe recalcar que las 3 etapas no son secuenciales, ya que su interacción no sigue ningún orden específico para cumplir con su objetivo final, la razón por las cuales fueron separadas es con el fin de conseguir una mejor comprensión del programa a desarrollar, ordenando sus operaciones o funciones.

Capítulo III

Implementación del proyecto

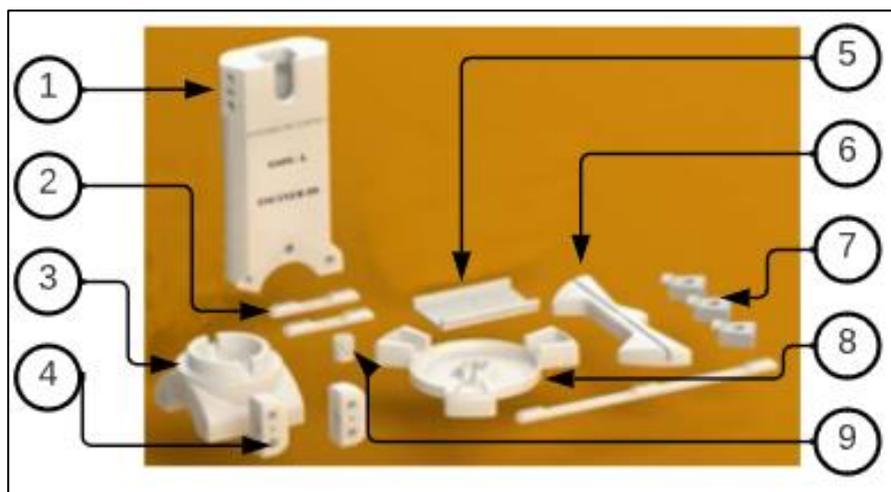
Elementos de la estructura del escáner

Al ser un proyecto de rediseño es necesaria la investigación del estado de la máquina realizada en la tesis de (Chasiluisa & Tapia, 2016), en los capítulos anteriores se realizó un análisis del estado actual del laboratorio de CNC de la universidad donde se pudo ver como se encuentra el escáner a ser usado. La estructura en general se encontraba en buenas condiciones por lo cual la mayoría de las piezas pueden reutilizarse para la implementación del proyecto.

Los elementos impresos en 3D a reutilizar en el proyecto se muestran en la **Figura 18**.

Figura 18

Piezas impresas en 3D a utilizar para el rediseño de la estación de escaneo 3D



Nota: Las piezas a utilizar en el proyecto se muestran en el orden: 1) Soporte principal, 2) Guarda cables, 3) Base para mesa rotativa, 4) Porta Laser, 5) Tapa de soporte Pieza, 6) Calibrador, 7) Pieza de sujeción, 8) Soporte de Disco, 9) Acople para moto NEMA 17.

Debido al cambio del controlador, el uso de soporte de pantalla ya no es necesario, por lo tanto, se acopla al sistema para el uso de una PC. Para el uso de los controladores de dispositivos se utilizaron los mismo establecidos por (Chasiluisa & Tapia, 2016) en el capítulo 2.

Montaje del escáner como estación de escaneo

Después de realizar la selección de elementos a reutilizar para la estructura del escáner, se procede a enlistar los componentes de sujeción y elementos secundarios necesarios adjuntos en el **Anexo D** como fue indicado anteriormente.

El montaje se realizó de la misma manera que en la tesis desarrollada por (Chasiluisa & Tapia, 2016), se trata de un procedimiento simple de ensamblaje. Durante el desarrollo del proyecto se realizó un mantenimiento del escáner. En la **Figura 19** se presenta el escáner previo al mantenimiento e implementación de rediseños.

Figura 19

Estado del escáner 3D antes de su rediseño como estación de escaneo 3D



Nota. En la figura se puede apreciar el estado del escáner presentado en el trabajo de (Chasiluisa & Tapia, 2016)

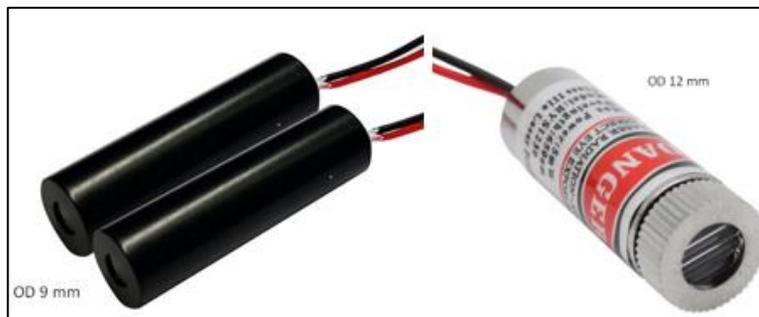
Durante el proceso de mantenimiento se dio prioridad a las partes móviles y las partes externas del escáner, en el ensamble del disco rotativo fue necesario lubricar el rodamiento montado para evitar el rozamiento que estaba generándose en el interior del mismo y evitar el

desgaste de la pieza, también se realizó una limpieza de todas las partes que componen la base de la mesa giratoria y soporte principal.

Los soportes de los módulos laser fueron modificados, en el análisis de la línea base se concluyó que uno de los módulos se encontraba defectuoso por lo cual fue necesario la adquisición e implementación de uno nuevo. La modificación en un soporte se debe a que los originales fueron diseñados específicamente para los módulos utilizados en el trabajo de (Chasiluisa & Tapia, 2016), **Figura 20** tienen un diámetro externo de 9mm; en el mercado nacional los únicos módulos de laser rojo lineal disponibles, de características similares en cuanto a potencia y enfoque eran con un diámetro exterior de 12 mm **Figura 20**.

Figura 20

Módulos laser comerciales

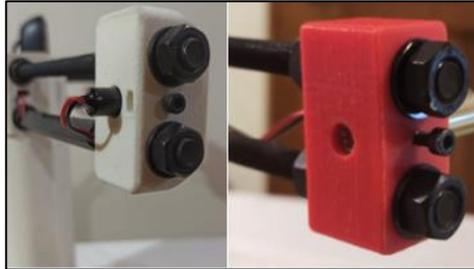


Nota: A la izquierda se puede apreciar el módulo laser original de 9 mm utilizado para el proyecto, a la derecha se presenta la versión implementada de 12 mm de diámetro.

Los soportes permitirán la alineación y sujeción de los módulos laser, estos pueden ser desplazados a lo largo de la varilla roscada y fijados con pernos para alcanzar una posición deseada por el usuario. Se recomienda colocar los soportes de manera que el haz de laser caiga de la manera más vertical posible sobre el objeto. En la **Figura 21** se pueden apreciar los dos soportes utilizados para la implementación de la estación de escaneo 3D.

Figura 21

Soporte de laser montado sobre varillas roscadas

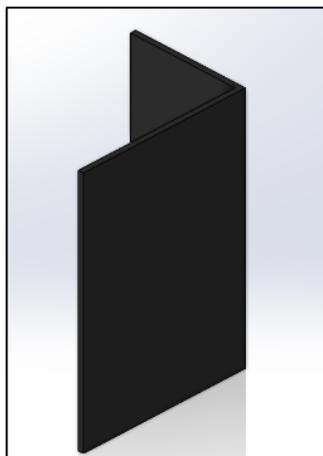


Nota: A la izquierda se aprecia el soporte original con apertura de 9mm implementado en el proyecto de (Chasiluisa & Tapia, 2016) a la derecha se presenta la versión modificada para portar módulos de 12 mm.

Con el fin de evitar lecturas erróneas durante el proceso de escaneo, se implementó sobre el prototipo un fondo de color negro. Esto permite al escáner trabajar con parámetros generales como se propuso anteriormente debido a que el ambiente de iluminación dentro del laboratorio CNC no sufre de cambios drásticos. A continuación, se presenta el fondo implementado para la estación de escaneo 3D

Figura 22

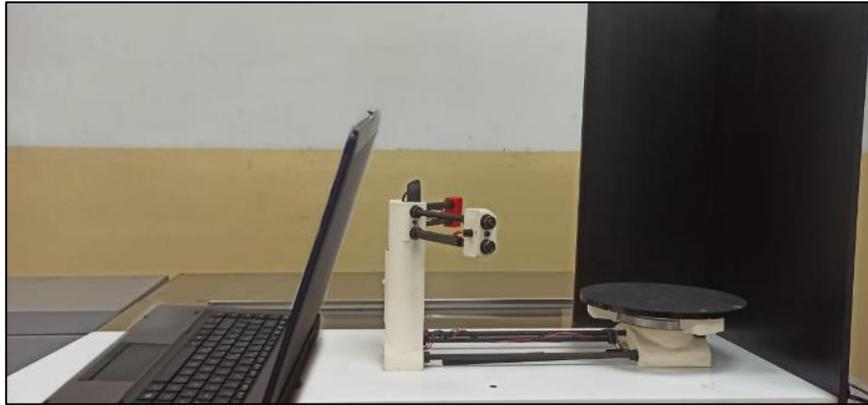
Pieza en L de madera pintada de color negro para el fondo de la estación de escaneo



Una vez implementados los rediseños de componentes y elementos del escáner se presenta en la **Figura 23** el estado final del prototipo para su implementación como estación de escaneo 3D.

Figura 23

Prototipo listo para su implementación como estación de escaneo 3D

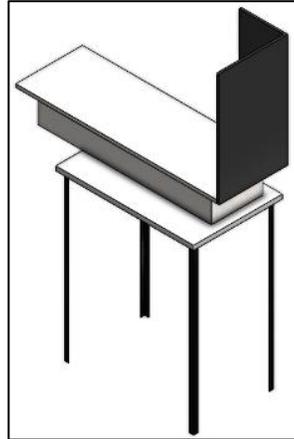


Montaje de la estación de escaneo en el sistema de manufactura integrada por computador

Para el montaje de la estación de escaneo 3D en el CIM primero es necesario conocer las medidas del manipulador y su nivel de altura para usarlo como referencia para la altura de la mesa de trabajo del escáner 3D. En el **Anexo E** se presentan los planos correspondientes al sistema del manipulador robótico con su eje para el desplazamiento, de la estación de escaneo implementada, y la distribución del sistema de manufactura integrada por computadora CIM. A continuación, en la **Figura 24** se presenta la mesa a utilizar para el montaje de la estación de escaneo dentro del CIM.

Figura 24

Mesa para montaje de estación de escaneo 3D dentro del sistema de manufactura integrada CIM

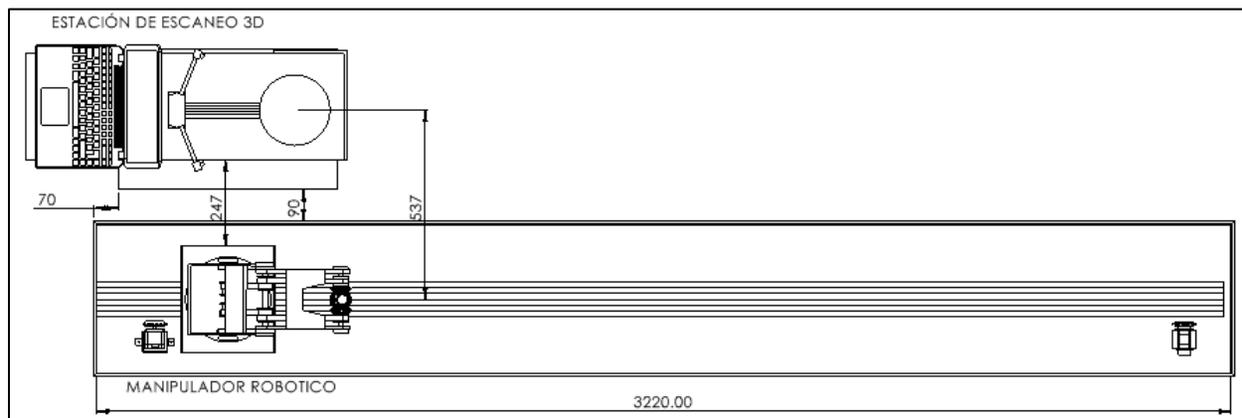


Con el fin de optimizar recursos se utilizará la mesa de trabajo original implementada por (Chasiluisa & Tapia, 2016) con medidas de 90 x 30 cm, es un espacio completamente accesible dentro de las especificaciones del radio de trabajo del robot manipulador Scrobot er4u de 610mm. Dentro de la mesa de trabajo mencionada se encuentra la base rotatoria del escáner, con una altura de 76 mm con respecto a la mesa, la altura referencial para el trabajo en el CIM es de 905mm con el fin de permitir un fácil acceso del manipulador a la mesa de trabajo sin la necesidad de alcanzar piezas por debajo del nivel de su base y evitar posiciones muy exigentes para el robot.

Dentro de la distribución del CIM la estación de escaneo 3D será la primera junto al robot manipulador, en la **Figura 25** a continuación se presenta la distribución de la estación dentro del CIM.

Figura 25

Distribución del CIM con el manipulador robótico y estación de escaneo 3D indexada



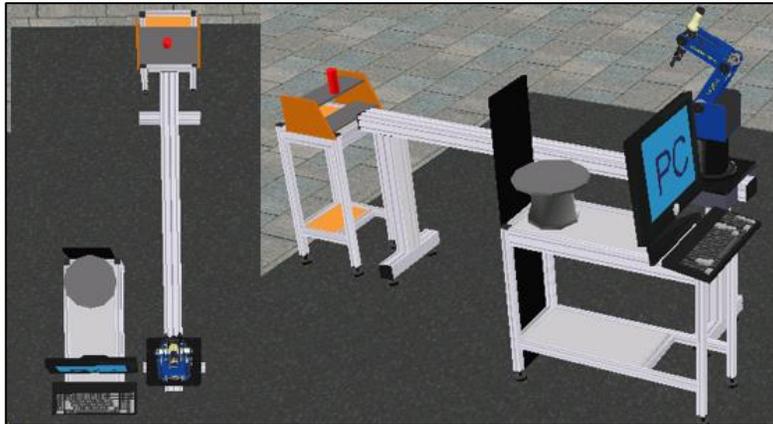
A partir de las medidas presentadas de la mesa de trabajo y de distancias entre mesas se realizará una etapa de simulación de la estación indexada en el CIM.

Simulación de la estación de escaneo 3D indexada al CIM

Para el montaje de la estación dentro del CIM es necesario que las medidas de la mesa de trabajo sean accesibles para el robot en toda su extensión, para asegurarse de que esto se cumpla, se debe realizar la ejecución de un proceso de simulación, con el fin de evitar posibles colisiones dentro del sistema y una entrada segura del manipulador a lo largo de la extensión de la estación de escaneo. Para la simulación presentada en la **Figura 26** se utilizó la misma dimensión de la mesa propuesta por (Chasiluisa & Tapia, 2016) de 900 x 300 mm, una distancia entre las mesas de trabajo de 247 mm, distancia entre centros de 537 mm (centro de mesa rotatoria del escáner y centro del eje 1 rotatorio del manipulador robótico) y la misma altura total de la estación de escaneo con el fondo negro incorporado 1400 mm.

Figura 26

Simulación de la estación de escaneo indexada al CIM

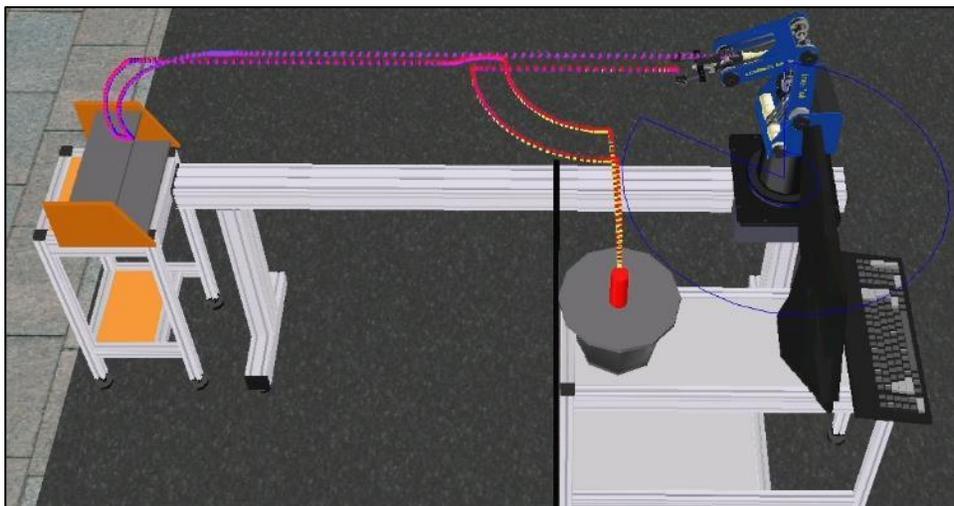


Para la simulación del proceso se utilizó el software RoboCell, este software es desarrollado por el mismo fabricante del manipulador a utilizar, por lo cual permite al usuario una comprensión mayor del proceso de programación del Scorbot ER-4u. En la simulación el manipulador parte de su posición base o home hacia la posición de la pieza a escanear ubicada en un AS/RS, se utilizó solo una pieza o trayectoria ya que el objetivo principal de la simulación es verificar que no existan colisiones con la estructura de la estación durante la manipulación del objeto a lo largo de la mesa de trabajo y que la mesa de escaneo se encuentre dentro del radio de acción del robot manipulador.

Mediante la ejecución de la simulación se pudo verificar que el diseño propuesto para la estación de escaneo puede ser utilizado sin ocasionar problemas de acceso o posiciones exigentes para el manipulador en ninguna de las rutinas a ejecutar (posicionamiento y retiro de pieza). A continuación, en la **Figura 27** se muestra el resultado final de la simulación del proceso de posicionamiento.

Figura 27

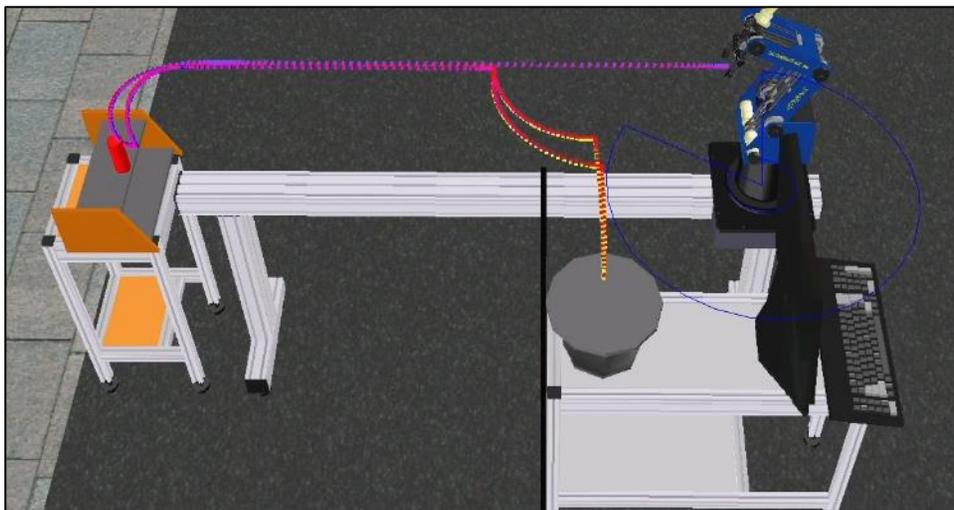
Simulación y trazado de trayectoria de rutina de posicionamiento de pieza de la estación de escaneo 3D



Se puede ver una trayectoria uniforme por parte del manipulador, que no presenta cambios bruscos durante su ejecución. A continuación, en la **Figura 27** se presenta la trayectoria trazada por el manipulador en la ejecución de la rutina de retiro de la pieza.

Figura 28

Simulación y trazado de trayectoria de rutina de retiro de pieza de la estación de escaneo 3D



La simulación presenta trayectorias seguras para el manipulador y el operador del sistema. Los resultados de la simulación fueron satisfactorios, ya que no se encontraron colisiones entre el manipulador y la estación de escaneo 3D. Esto demuestra que el diseño del sistema de manufactura es seguro y eficiente, y que la integración de la tecnología de escaneo 3D no representa un riesgo para el correcto funcionamiento del manipulador. En conclusión, la simulación de trayectorias del CIM ha sido un éxito, y proporciona la certeza de que el sistema funcionará de manera segura y eficiente una vez implementado en un entorno real.

Conexiones de ordenador, placas y elementos externos

Como se estableció en la **Tabla 3** y **Tabla 5** con el fin de optimizar recursos y simplificar el sistema el controlador principal para el escáner será el mismo que el sistema para gestionar la comunicación en el proyecto, en este caso se utilizará una PC por lo cual se reduce la complejidad de conexiones **Figura 29** solo siendo necesario conectar en los puertos USB del ordenador los cables de la placa de control de dispositivos y cámara web.

Figura 29

Conexión de dispositivos en puertos USB del ordenador y captura de dispositivos



Desarrollo de aplicación para indexación al sistema CIM

En el proyecto desarrollado por (Chasiluisa & Tapia, 2016) se estableció que para el funcionamiento del escáner 3D se utiliza la aplicación libre de escaneo 3D Horus. Los archivos correspondientes al proyecto Horus se encuentran en GitHub, actualmente el proyecto ya no cuenta con soporte de sus creadores.

Para su implementación en el presente proyecto primero fue necesario realizar un proceso de portabilidad de sistema operativo Raspbian/Windows, esto con el fin de poder ejecutar el programa sin problemas desde una PC e iniciar con las modificaciones necesarias para su aplicación como estación de escaneo 3D.

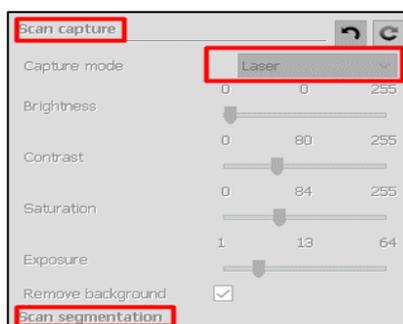
Para conseguir la indexación del escáner como estación dentro de un CIM es necesario limitar ciertas funciones originales del escáner. A continuación, se mencionan los cambios en la aplicación realizados para el desarrollo de la estación de escaneo

Calibración

Como se estableció anteriormente el escáner trabaja con parámetros predefinidos en extensión .JSON para ser utilizado dentro del CIM, en caso de ser necesario el usuario puede realizar la calibración avanzada o completa de la estación iniciando un proceso de calibración manual a través del ordenador central. Con el fin de simplificar el proceso de escaneo los parámetros clave a modificar para conseguir una nube de puntos aceptable son los relacionados al escaneo laser, textura y segmentación de escaneo **Figura 30**. El proceso de calibración avanzada tiene que ser realizada manualmente desde la estación debido a que los valores se escogen en base a la interpretación visual de la proyección del láser sobre el objeto a escanear y la cantidad de datos utilizados para la calibración de escaneo.

Figura 30

Apartado de configuración de parámetros de captura de escaneo y segmentación

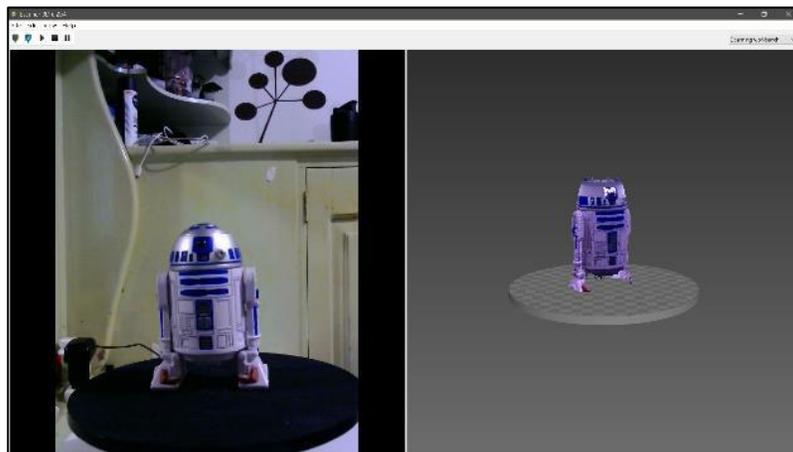


Visualización del proceso de escaneo en tiempo real

En el proyecto original (Chasiluisa & Tapia, 2016) se deshabilitaron todas las funciones de visualización en tiempo real del sólido escaneado, debido a las limitaciones presentadas por el controlador principal del escáner, en el proyecto desarrollado se permite realizar la visualización en tiempo real del escaneo desde la estación **Figura 31**. Su envío para seguimiento en el ordenador central resulta un proceso complejo debido al número de puntos y datos que maneja la reconstrucción del sólido en el proceso de escaneo 3D lo cual no permite esta función.

Figura 31

Visualización de sólido en tiempo real durante proceso de escaneo



Proceso de escaneo

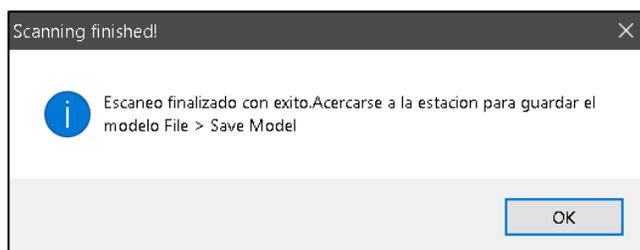
El proceso de escaneo al igual que la tesis original utiliza métodos de triangulación laser, para la implementación del escáner en el CIM se usa la misma técnica con la diferencia que será ejecutada por solo un módulo de laser, esto es con el fin de tener una sola interpretación del sólido, permitiendo al usuario un modelo mucho más estable en comparación con un escaneo bilateral.

Guardado de archivo de nube puntos

Al igual que en el proyecto original es necesario guardar la nube de puntos generada por el escáner. En el caso del proyecto desarrollado para un CIM una vez culminado el escaneo de un sólido, es necesario realizar el proceso de guardado del modelo desde la estación para que el archivo con la nube de puntos .ply se encuentre disponible para el ordenador central mediante el uso de carpetas compartidas. Una vez culminado el proceso de escaneo, se genera una ventana de aviso con las indicaciones para guardar el archivo en la red del CIM **Figura 32**.

Figura 32

Ventana de mensaje generada en la estación una vez finalizado el proceso de escaneo



Implementación de la comunicación

Como se indicó en el estado del arte del proyecto, para la implementación de un sistema de manufactura integrada por computadora CIM es indispensable la comunicación entre la estación y el ordenador central. En la **Tabla 4** se selecciona al MQTT como protocolo de comunicación para el proceso.

Uso de protocolos MQTT

Para realizar la aplicación de protocolos MQTT en Python es necesaria la instalación de las librerías Paho-MQTT, cuya función es permitir al usuario conectarse como cliente MQTT. Para el uso de estos protocolos requiere un bróker, en este caso se utiliza Mosquitto, es un

bróker de MQTT de licencia libre desarrollado por Eclipse, el mismo cumple con todas las funciones necesarias a desempeñar por un bróker; permite la suscripción y publicación a distintos tópicos dentro de la red. Los logotipos de ambos se presentan en la **Figura 33**.

Figura 33

Logotipo de MQTT y bróker Mosquitto



En el caso del presente proyecto se crearon dos tópicos, uno encargado de recibir y enviar datos de ordenes entre el ordenador central y la estación y otro para publicar el estado de la estación a lo largo de su ejecución de procesos. Cada uno de los procesos tiene su propia clase dentro del sistema, para la ejecución de ordenes se creó la clase TestMQTT **Figura 34** consta de las dos funciones básicas de MQTT `client.on_connect` y `client.on_message` cada una se encarga de establecer la conexión con el bróker y la acción que procede a ejecutar de acuerdo con el mensaje recibido, se encuentra suscrito en el bróker Test.

Esta clase contempla distintas acciones de acuerdo con el dato recibido

Inicio de estación de escaneo: Inicializa la estación de escaneo, seleccionando el archivo de parámetros generales de calibración .JSON dejando lista a la estación para la ejecución de órdenes.

Conectar dispositivos (cámara y controladores): Establece la conexión a través de puerto serial de la tarjeta BQ ZUM Core (controla láseres y motor a pasos) y de la cámara web Logitech C270 y realiza una comprobación de conexión de dispositivos.

Desconectar dispositivos (cámara y controladores): Desconecta los dispositivos mencionados anteriormente y realiza una comprobación.

Inicio de escaneo: Inicia el proceso de escaneo del solido ubicado en la mesa giratoria.

Pausar escaneo: Pausa el escaneo en caso de ser necesario.

Detener escaneo: Detiene por completo el proceso de escaneo

Detener comunicación: Finaliza la ejecución del programa de escaneo y detiene la comunicación.

Figura 34

Clase TestMQTT creada para la ejecución de comandos de la estación de escaneo 3D indexada al CIM

```

24 class TestMQTT:
25
26     new ^
27     def _init_(self):
28         print("inicia")
29
30     new ^
31     def publicar(self,message):
32         if(not client.is_connected()):
33             # client.connect(host='192.168.107.47', port=1883)
34             client.connect(host='localhost', port=1883)
35         client.publish(topic='Test1', payload=message, qos=0)
36

```

Para la publicación de mensajes de inicio y fin de escaneo se creó la clase PubMQTT

Figura 35, esta hace uso de las funciones `client.on_connect` y `client.publish`, encargadas de la conexión y suscripción en el tópico y la publicación de mensajes tipo string en el tópico designado Test1.

Figura 35

Creación de la clase PubMQTT encargada de la publicación de datos del estado de la estación de escaneo en el servidor central.

```

16 class PublishMqtt:
17
18     new ^
19     def _init_(self):
20         print("inicia")
21
22     new ^
23     def connect_mqtt(self):
24
25         client = mqtt_client.Client(client_id)
26         # client.username_pw_set(username, password)
27         client.connect(broker, port)
28         return client
29
30     new ^
31     def publish(self,client,message):
32         result = client.publish(topic, message)
33

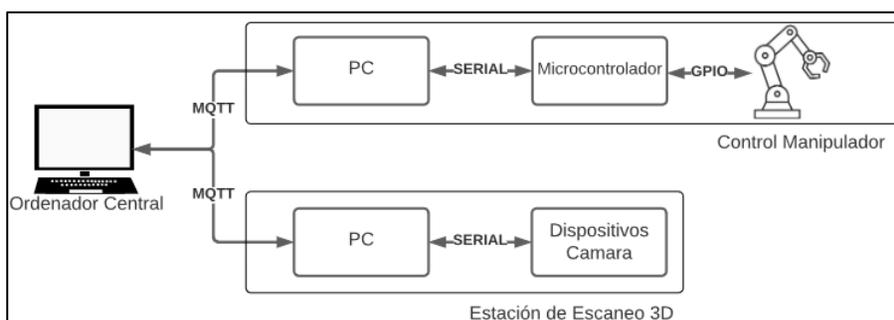
```

Uso de MQTT a nivel del CIM

Para comprender el uso de los protocolos MQTT dentro del CIM es necesario establecer la topología de comunicación a implementar. En la **Figura 36** se puede apreciar la comunicación entre cada estación y ordenador central con el fin de realizar una ejecución de procesos ordenada dentro del CIM.

Figura 36

Topología de red del escáner 3D indexado al CIM como estación de escaneo 3D

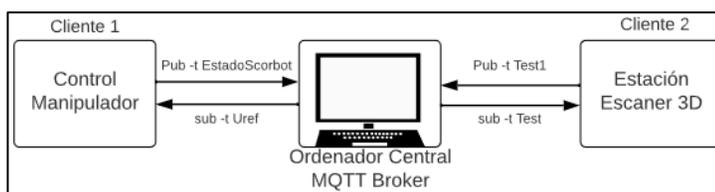


Nota. Se presenta una topología de red de manera general, ya que incluye las comunicaciones internas dentro de las estaciones involucradas.

Debido a que para la implementación de la estación en el CIM se utilizan protocolos MQTT es necesario establecer la topología de la red nuevamente, pero esta vez enfocada en el uso de estos protocolos **Figura 37**.

Figura 37

Topología de red MQTT de la estación de escaneo 3D y robot manipulador indexados al CIM

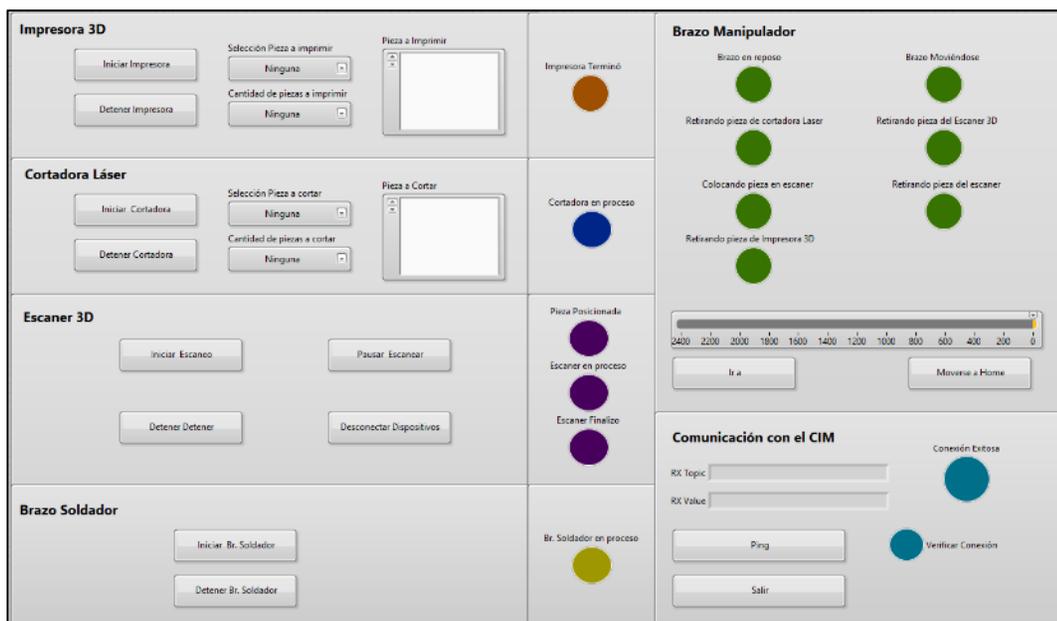


En la **Figura 37** se aprecia cada uno de los elementos del protocolo MQTT utilizado. El papel del bróker es ejecutado en el ordenador central asignado mediante su IP, los tópicos de

publicación de mensajes de estado en el ordenador central (*EstadoScorbot* y *Test1*) y los tópicos de envío de comandos desde el ordenador a las estaciones (*Uref* y *Test*). El enlace entre las estaciones es realizado por el ordenador central, para el control y supervisión del proceso de la estación de escaneo se creó un HMI **Figura 38** que debe ser ejecutado para asignar procesos en las estaciones.

Figura 38

HMI desarrollado para el control del CIM, ubicado en sección de estación de escaneo 3D



La sección de escaneo del HMI desarrollado cuenta con 2 partes principales,

1. “Iniciar Escaneo” se encarga de enviar mensajes a los tópicos de comandos de las estaciones indicando la posición del objeto a escanear para el manipulador e inicializando el proceso de escaneo en la estación desarrollada, enviando el manipulador robótico a recoger el objeto a escanear y posicionándolo en la mesa de escaneo 3D.
2. “Pausar Escáner”, “Detener Escáner”, “Desconectar Dispositivos” estos botones son para el uso manual del escáner de manera independiente al brazo robótico.

Capítulo IV

Pruebas y resultados

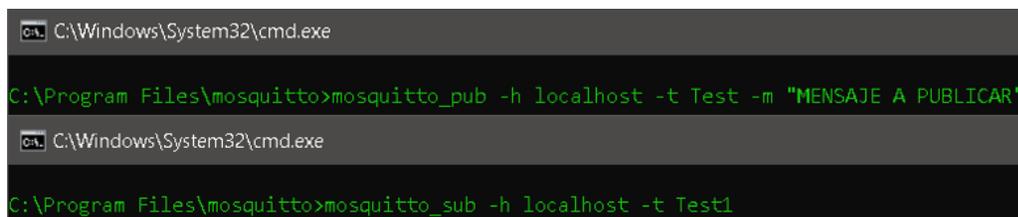
Las pruebas de la estación de escaneo se realizaron en tres etapas, la primera consiste en una prueba de los protocolos de conexión con el escáner verificando el envío de mensajes de comandos en el tópico TEST y la recepción de mensajes de estado del escáner en el tópico TEST 1, la segunda es una etapa de ensayos de funcionamiento del escáner con sus resultados generados después del mantenimiento realizado sobre el prototipo de (Chasiluisa & Tapia, 2016) y pruebas de escaneo utilizando el comando de escaneo automático, como tercera etapa se ejecutaron pruebas de funcionamiento como estación de escaneo en el CIM.

Pruebas de protocolo MQTT

Para esta prueba se utiliza la PC junto con el escáner, primero en la carpeta raíz de Mosquitto C:\Archivos de Programa\mosquitto se inicia una ventana de símbolo del sistema, se publica en el tópico Test encargado de enviar los comandos a la estación y se suscribe en el tópico Test1 que recibe mensajes del estado del escáner utilizando los comandos mosquitto_pub y mosquitto_sub respectivamente como se muestra en la **Figura 39**.

Figura 39

Ingreso de comandos para publicar en tópico Test y suscribir en el tópico Test1 para pruebas de comunicación desde la PC



```
C:\Windows\System32\cmd.exe
C:\Program Files\mosquitto>mosquitto_pub -h localhost -t Test -m "MENSAJE A PUBLICAR"

C:\Windows\System32\cmd.exe
C:\Program Files\mosquitto>mosquitto_sub -h localhost -t Test1
```

Una vez establecidos los lazos de comunicación se procede a iniciar el programa Horus, el mismo tiene funciones para escuchar y publicar en MQTT en segundo plano. Para las

pruebas de comunicación se establecieron distintos comandos definidos en la **Tabla 11** con el fin de comprobar la ejecución correcta de cada función asignada.

Tabla 11

Comandos a enviar en tópico Test, funciones a ejecutar y mensajes de estado en tópico Test1 para las pruebas de la estación de escaneo 3D

Mensaje en -t Test	Función a ejecutar	Mensaje en -t Test1
0	Inicia estación de escaneo con parámetros de calibración predeterminados	“Inicio de estación de escaneo”
1	Conecta dispositivos	“Dispositivo conectado exitosamente” / “Dispositivo NO Conectado Revisar Estación”
2	Desconecta dispositivos	“Dispositivo desconectado exitosamente”
3	Inicia escaneo	“Inicio de escaneo” / “Dispositivos no conectados”
4	Pausa escaneo	“Escaneo Pausado”
5	Detiene escaneo	“Escaneo Detenido”
7	Escaneo automático	“Escaneo Automático CIM”
Carácter ≠ (0,1,2,3,4,5,7)	No ejecuta función	“Orden no soportada”

A continuación, en la **Tabla 12** se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados de envío de mensaje en el tópico Test y mensaje publicado en el tópico Test1.

Tabla 12

Ensayos de aplicación de protocolos MQTT sobre el escáner 3D

Orden	Tópico	Comando/Mensaje recibido	Resultado
0	Test	C:\Program Files\mosquitto>mosquitto_pub -h localhost -t Test -m 0	Ensayo Exitoso
	Test1	C:\Program Files\mosquitto>mosquitto_sub -h localhost -t Test1 Inicio De Estacion De Escaneo	
1	Test	C:\Program Files\mosquitto>mosquitto_pub -h localhost -t Test -m 1	Ensayo Exitoso
	Test1	Dispositivo Conectado Exitosamente	
2	Test	C:\Program Files\mosquitto>mosquitto_pub -h localhost -t Test -m 2	Ensayo Exitoso
	Test1	Dispositivo Desconectado Exitosamente	
3	Test	C:\Program Files\mosquitto>mosquitto_pub -h localhost -t Test -m 3	Ensayo Exitoso
	Test1	Inicio de escaneo	
4	Test	C:\Program Files\mosquitto>mosquitto_pub -h localhost -t Test -m 4	Ensayo Exitoso
	Test1	Escaneo Pausado	

Orden	Tópico	Comando/Mensaje recibido	Resultado
5	Test	C:\Program Files\mosquitto>mosquitto_pub -h localhost -t Test -m 5	Ensayo
	Test1	Escaneo Finalizado	Exitoso
7	Test	C:\Program Files\mosquitto>mosquitto_pub -h localhost -t Test -m 7	Ensayo
	Test1	Escaneo Automatico CIM	Exitoso

Pruebas de funcionamiento del escáner 3D

Una vez comprobado el funcionamiento correcto de la comunicación MQTT se procede a realizar pruebas del estado del escáner, se utilizó solamente el escáner 3D de manera manual **Figura 23** es decir de manera independiente al sistema de manufactura integrada por computadora CIM. Se realizó una serie de ensayos con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del sistema de escaneo 3D en general, los ensayos realizados y resultados obtenidos se describen en la **Tabla 13**.

Tabla 13

Descripción y resultados de los ensayos de funcionamiento realizados sobre el escáner 3D

Ensayo	Descripción	Resultado
Comprobación de giro de mesa	Mediante el uso de la aplicación de Horus se envían ordenes al motor Nema 17 y se comprueba el movimiento de la mesa	Ensayo exitoso
Funcionamiento de controladores de dispositivos	Se conectan los controladores de dispositivos a la PC y se revisan el reconocimiento en los puertos COM	Ensayo exitoso
Funcionamiento de cámara	Se ejecuta la aplicación de cámara en Windows y se revisa la conexión de la cámara con la aplicación Horus mediante el uso de funciones de captura de imágenes.	Ensayo exitoso
Estado de los láseres	Se envía una señal a los módulos laser mediante la aplicación Horus y se comprueba su intensidad y enfoque	Ensayo exitoso

Pruebas de escaneo 3D independientes

Con el fin de obtener pruebas más completas del funcionamiento independiente del escáner 3D se realizarán una serie de pruebas de escaneo. Las pruebas a realizar están enfocadas principalmente en la similitud de los detalles estéticos, se analizaron 9 sólidos distintos con diferentes niveles de dificultad a nivel detalle. El uso de una etapa de análisis de medidas no será necesario ya que las comparaciones serán de manera visual y con el fin de hallar la precisión de similitud a nivel detalle del escáner 3D se ocupará la norma ASTM F2792-12.

Esta norma se utiliza para la comparación de similitud estética entre una nube de puntos y un modelo, su procedimiento implica seguir ciertos pasos y consideraciones:

1. Selección del modelo de referencia
2. Escaneo 3D del modelo
3. Generación de archivo de nube de puntos en formato .ply
4. Realizar una comparación visual entre el modelo de referencia y la nube de puntos tomando en cuenta parámetros de forma, textura, color y brillo.
5. Cada parámetro se evalúa en una escala del 1 al 7 donde 1 indica una gran diferencia y 7 indica una gran similitud, se promedian los valores para obtener una puntuación global de similitud estética.

A continuación, en la **Tabla 14** se presenta el sólido a escanear y la nube de puntos generada

Tabla 14

Pruebas de escaneo realizadas sobre objetos de distintas complejidades

Prueba	Modelo a escanear		Nube puntos generada
1			
2			
3			
4			
5			

Prueba	Modelo a escanear	Nube puntos generada
6		
7		
8		
9		

Análisis de resultados de escaneo 3D independiente al CIM

Como se indicó anteriormente para el análisis de los resultados generados en las pruebas presentadas en la **Tabla 14** se utilizará la norma ASTM F2792-12. Los parámetros a analizar serán forma, textura, color y brillo; y su calificación en cuanto a similitud será del 1 al 7 donde 1 indica una gran diferencia y 7 indica una gran similitud. Para el análisis de cada prueba

se utilizará el número asignado a cada una del 1 al 9 calificación de parámetros y un promedio total para obtener una puntuación global de similitud estética.

Para la visualización de la nube de puntos generada se utilizó el software de procesamiento de mallas 3D nativo de Horus.

A continuación, en la **Tabla 15** se presenta la aplicación de la norma ASTM F2792-12

Tabla 15

Aplicación de los criterios de comparación estéticos de la norma ASTM F2792-12

Prueba	Parámetro	Puntuación	Puntuación global
1	Forma	6	6
	Textura	6	
	Color	6	
	Brillo	6	
2	Forma	5	5.75
	Textura	6	
	Color	6	
	Brillo	6	
3	Forma	4	6.25
	Textura	7	
	Color	7	
	Brillo	7	
4	Forma	6	5.75
	Textura	6	
	Color	5	
	Brillo	6	
5	Forma	5	5.75
	Textura	6	
	Color	7	
	Brillo	5	
6	Forma	6	6.75
	Textura	7	
	Color	7	
	Brillo	7	
7	Forma	5	5
	Textura	5	
	Color	5	
	Brillo	5	

Prueba	Parámetro	Puntuación	Puntuación global
8	Forma	6	6.75
	Textura	7	
	Color	7	
	Brillo	7	
9	Forma	5	5.75
	Textura	6	
	Color	6	
	Brillo	6	

Una vez aplicados los parámetros de análisis establecidos por la norma ASTM F2792-12, se pudo identificar que las pruebas con una puntuación global mayor a 6 son las 8, 6, 3 y 1; lo que indica que el escáner consigue una réplica de mayor nivel de similitud al momento de analizar objetos sin cambios bruscos de forma o color, que no contengan caras rectas y sin detalles sobresalientes. El resto de pruebas (9, 7, 5, 4 y 2) contienen características de cambios bruscos en secciones, colores y caras rectas que dificultan su reconstrucción correcta al momento de su escaneo. El desempeño general presentado por el escáner en cuanto a similitud estética de la nube de puntos recibe una puntuación global de 6 lo que representa un nivel de similitud aceptable para el sistema.

Pruebas de funcionamiento como estación de escaneo indexado al CIM

Para realizar las pruebas de funcionamiento como una estación de escaneo indexada a un CIM se utilizará la topología de red establecida en la **Figura 37**. Para iniciar con la ejecución de las pruebas se requiere establecer los procesos de suscripción a los tópicos Test y Uref encargados del envío de comandos desde el ordenador central, de esta manera se da paso a la escucha en segundo plano de todos los mensajes en los tópicos y permite ejecutar la orden al ser solicitada. El enlace entre las estaciones se realiza mediante la ejecución del programa de control desde el ordenador central presentado en la **Figura 38**.

Una vez iniciado el ordenador central y que las estaciones se encuentren en modo de escucha MQTT se da paso al inicio de procesos de rutinas del robot manipulador en conjunto con funciones de escaneo 3D. De la misma manera que se analizó en las pruebas de la comunicación MQTT, el ordenador central se encargara de recibir los mensajes de estado de las estaciones y enviar las órdenes a cada estación según sea requerido.

A continuación, en la **Tabla 16**, se muestran los mensajes de estado generados al ejecutar rutinas dentro de la estación de escaneo junto con la estación, tópico y estado correspondiente a cada una.

Tabla 16

Mensajes de estado de estaciones recibidos en el ordenador central al ejecutar rutinas en la estación de escaneo 3D

Estación	Tópico	Mensaje	Estado
Robot manipulador	EstadoScorbot	Posicionando Pieza	El robot parte de su posición home hacia la localización designada de la pieza
		Pieza Posicionada correctamente	La pieza ha sido colocada correctamente en la mesa de escaneo
Escaneo 3D	Test1	Dispositivos de escaneo conectados exitosamente	Se pudo establecer la conexión entre dispositivos de escaneo y controlador
		Inicio de escaneo	Inicia el proceso de escaneo
		Escaneo Automático CIM	Detecta el funcionamiento dentro del CIM
		Proceso finalizado acercarse a la estación de escaneo	Finalizó el proceso de escaneo del objeto colocado en la mesa de escaneo

Pruebas de escaneo 3D indexado a un sistema CIM

Una vez realizadas las pruebas de comunicación de manera independiente e indexada a un sistema CIM, y haber aprobado los ensayos generales de funcionamiento, se procede a la ejecución de rutinas de escaneo de objetos de distintas complejidades en la estación de

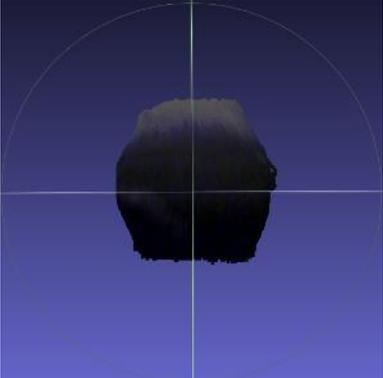
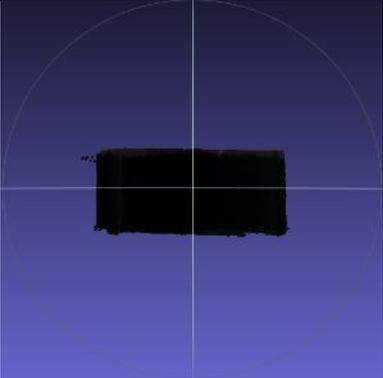
escaneo 3D indexada a un sistema CIM. Las pruebas de escaneo en esta etapa tienen un enfoque de precisión de medidas reales y obtenidas haciendo uso de piezas mecanizadas cilíndricas, cúbicas y esféricas. En esta etapa es necesario comprobar la correcta implementación del proceso de digitalización del sólido a analizar y la calidad de la nube de puntos generada.

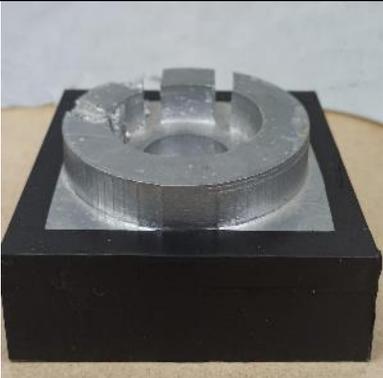
A continuación, en la **Tabla 17** se presenta el sólido a escanear y la nube de puntos generada, debido a que las pruebas a realizar se enfocan en la similitud de medidas reales y escaneadas se realizaron 6 escaneos de distintos objetos mecanizados en metal con el fin de cubrir distintos tipos de geometrías cilíndrica, cúbica y esférica. De cada una de las distintas formas indicadas se usaron una medida grande y una mediana para comprobar el error correspondiente a cada medida en la siguiente etapa de posprocesado y análisis.

Tabla 17

Pruebas de escaneo sobre piezas mecanizadas en metal

Geometría	Tamaño	Modelo a escanear	Nube puntos generada
Cilíndrica	Mediano		

Geometría	Tamaño	Modelo a escanear	Nube puntos generada
	Grande		
	Mediano		
Esférica	Grande		
Cúbica	Mediano		

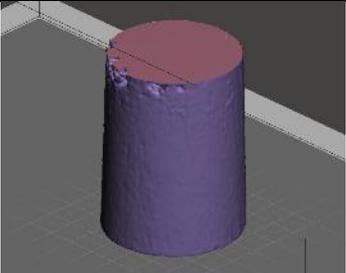
Geometría	Tamaño	Modelo a escanear	Nube puntos generada
	Grande		

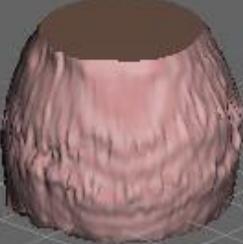
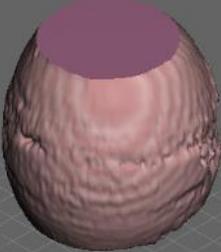
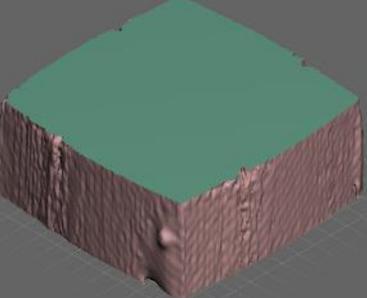
Posprocesado y análisis

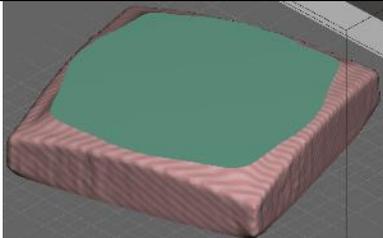
Como se indicó anteriormente el escáner genera nubes de puntos, estos son archivos de extensión .ply que representan una aproximación de un modelo o sólido en el espacio. Con el fin de obtener un archivo utilizable para distintas aplicaciones es necesario el posprocesamiento, esta etapa permite pulir las nubes de puntos y crear sólidos a partir de las mismas en formato .STL, en el caso del proyecto los sólidos se utilizarán para obtener medidas y poder realizar una comparación con los valores reales. Para el posprocesamiento de los archivos se utilizó el software libre Meshlab y para el análisis del sólido el programa Autodesk Meshmixer. A continuación, en la **Tabla 18**, se presenta el sólido posprocesado en Meshmixer de cada una de las pruebas realizadas en la **Tabla 17** en el mismo orden.

Tabla 18

Etapa de posprocesado de nubes de puntos obtenidas en pruebas sobre piezas mecanizadas

Geometría	Tamaño	Sólido Posprocesado
Cilíndrica	Mediano	

Geometría	Tamaño	Sólido Posprocesado
	Grande	
	Mediano	
Esférica	Grande	
Cúbica	Mediano	

Geometría	Tamaño	Sólido Posprocesado
	Grande	

Una vez concluida la etapa de posprocesado, en la **Tabla 19** se procede a realizar el análisis de cada archivo .STL generado y su comparación con las medidas reales de cada objeto.

Tabla 19

Medidas de la pieza mecanizada en metal y el sólido escaneado .STL

Geometría	Tamaño	Medidas sobre .STL (mm)			Medidas sobre modelo (mm)		
		Diámetro	Altura	Cara lateral	Diámetro	Altura	Cara Lateral
Cilíndrica	Mediano	51.061	90.45	-	51	90	-
	Grande	50.829	150.91	-	51	150	-
Esférica	Mediano	15.678	-	-	15.75	-	-
	Grande	31.245	-	-	31.65	-	-
Cúbica	Mediano	-	21.532	61.73	-	20	60
	Grande	-	28.186	103.61	-	26	100

A continuación, en la **Tabla 20**, se procede a realizar el cálculo de la diferencia entre las medidas obtenidas sobre la pieza mecanizada original y del sólido generado después de la etapa de posprocesado.

Tabla 20

Diferencia de medidas de la pieza mecanizada en metal y el sólido escaneado .STL

Geometría	Tamaño	Diferencia de medida (mm)			Error (%)		
		Diámetro	Altura	Cara lateral	Diámetro	Altura	Cara lateral
Cilíndrica	Mediano	0.061	0.45	-	0.11	0.50	-
	Grande	0.171	0.91	-	0.33	0.60	-

		Diferencia de medida (mm)			Error (%)		
Esférica	Mediano	0.072	-	-	0.45	-	-
	Grande	0.405	-	-	1.27	-	-
Cúbica	Mediano	-	1.532	1.73	-	7.66	2.83
	Grande	-	2.186	3.61	-	8.40	3.61

En la **Tabla 20** se realizó el cálculo del error porcentual de una medida tomada de cada una de las geometrías en tamaños medianos y grandes, mediante el análisis de los resultados obtenidos se puede notar un menor porcentaje de error en figuras de dimensiones menores, pero este tipo de análisis no es suficiente como para considerarlo una conclusión general por lo cual se hará uso de la norma ISO 5725 que se encarga de brindar directrices para la evaluación de resultados de medición. La norma establece que una vez calculado el error de medición entre los valores obtenidos y los valores reales para la interpretación de los mismos el usuario debe apoyarse en una gráfica para apreciar de una mejor manera el error obtenido. Para esta etapa se profundizó más en la toma de medidas de cada uno de los modelos presentados en la **Tabla 19** de manera que se realizaron 3 medidas de cada uno para hallar la diferencia con la medida real y obtener un promedio de error. A continuación, en la **Tabla 21** se presentan las medidas obtenidas para las piezas cilíndricas.

Tabla 21

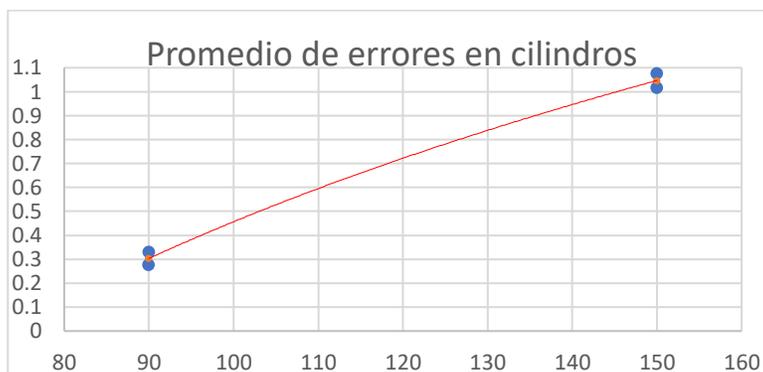
Toma de medidas para la longitud de piezas cilíndricas y cálculo de error promedio

Pieza	Longitud (mm)	1-1´	2-2´	3-3´	Error 1	Error 2	Error 3	Promedio
Cilindro 1	90	90.45	90.3	90.12	0.45	0.3	0.12	0.29
Cilindro 1	90	90.54	90.32	90.16	0.54	0.32	0.16	0.34
Error en piezas pequeñas								0.315
Cilindro 2	150	150.9	151	151.1	0.91	1.02	1.12	1.01666667
Cilindro 2	150	151	151.1	151.1	1.04	1.06	1.13	1.07666667
Error en piezas grandes								1.04666667

Realizando una gráfica de los promedios de errores obtenidos en medidas de los cilindros se obtiene

Figura 40

Grafica de promedio de errores obtenidos en la longitud de figuras cilíndricas

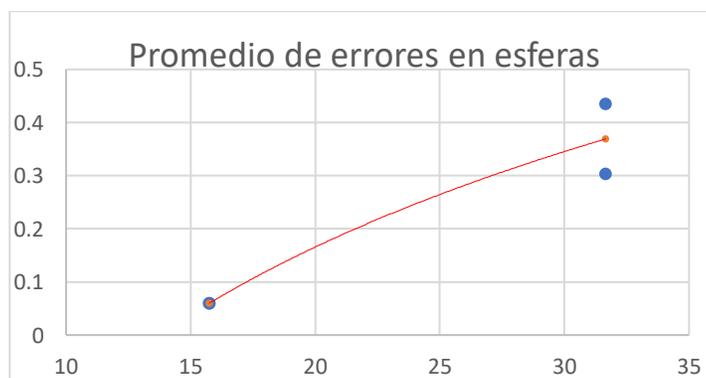


En la **Figura 40** se puede apreciar un gráfico de la línea de tendencia de promedios de error y los errores representados como puntos, tanto en los resultados numéricos de la **Tabla 21** como en los que se visualizan en la **Figura 40** se puede llegar a la conclusión que existe un porcentaje menor de error cuando se escanean piezas pequeñas.

En la **Figura 41** a continuación, se presenta la gráfica perteneciente al promedio de errores en esferas, las tablas de mediciones obtenidas se presentan en el **Anexo F**.

Figura 41

Grafica de promedio de errores obtenidos en la longitud de figuras esféricas

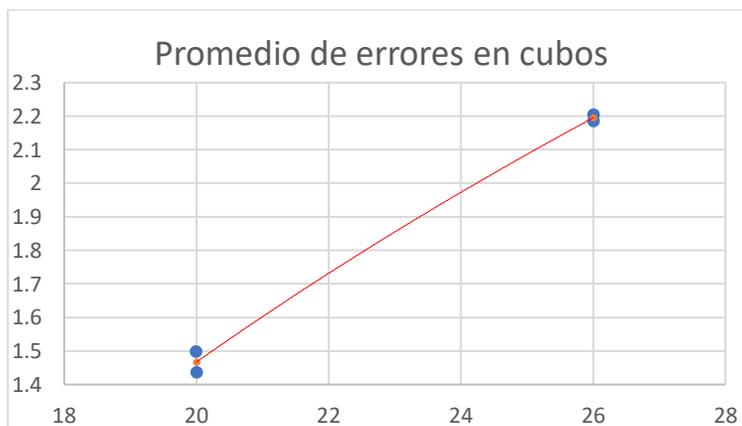


De la misma manera que en las piezas cilíndricas se cumple la tendencia de que el error disminuye considerablemente en piezas de menores dimensiones. De todas maneras, el error de medida en las esferas grandes sigue estando dentro de un parámetro aceptable (menor a 0.5 mm).

En la **Figura 42** se puede apreciar el grafico generado para las mediciones de figuras cúbicas, cabe recalcar que como se mencionó en las pruebas individuales y en los errores porcentuales calculados en la **Tabla 20** el porcentaje de error en solidos con caras planas es mucho mayor debido a las limitaciones presentadas por el prototipo.

Figura 42

Grafica de promedio de errores obtenidos en la longitud de figuras cúbicas



En la **Figura 42** se puede apreciar un error mayor a 1 mm en piezas pequeñas lo que representa un valor sumamente elevado en comparación con los errores calculados anteriormente. El error es alto indistintamente del tamaño de la pieza cubica lo que corrobora lo establecido anteriormente, el escáner funciona de mejor manera con piezas cilíndricas de dimensiones menores a 10 cm de altura.

Validación de la hipótesis

Validación de hipótesis individual

La hipótesis individual que se planteó para el proyecto es: ¿Mediante el rediseño e implementación del escáner 3D ESPEL se podrá indexar al CIM como estación de escaneo 3D en el laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Latacunga?

Variables de la hipótesis

Variable Independiente: El rediseño e implementación del escáner 3D ESPEL

Variable Dependiente: Indexar al CIM como estación de escaneo 3D

En toda investigación la variable independiente es lo que se va a manipular o cambiar para comprobar si tiene un efecto sobre la variable dependiente. Es por esto que se realizaron pruebas del escáner de manera individual e indexado al CIM evaluando los parámetros designados anteriormente

Método aplicado

Partiendo de la hipótesis planteada se puede definir H1 y H0, que representan el cumplimiento o nulidad de la hipótesis planteada.

Hipótesis alternativa (H1): Mediante el rediseño e implementación del escáner 3D ESPEL **SI** se podrá indexar al CIM como estación de escaneo 3D en el laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Latacunga

Hipótesis nula (H0): Mediante el rediseño e implementación del escáner 3D ESPEL **NO** se podrá indexar al CIM como estación de escaneo 3D en el laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Latacunga

Para validar la hipótesis se hizo uso de índices, se obtuvo una relación porcentual para conocer el desempeño del escáner en cada caso mencionado.

Similitud estética

Con el fin de analizar la similitud estética entre la nube de puntos generada y el modelo original a ser escaneado, durante las pruebas individuales se hizo uso de la norma ASTM F2792-12, encargada de englobar parámetros de similitud en forma, textura, color y brillo en una sola puntuación global evaluada sobre 7. La normativa recomienda que la puntuación global de un escáner 3D aceptable debe ser mayor a 5 (71.42%); el desempeño general presentado por el escáner en cuanto a similitud estética de la nube de puntos recibe una puntuación global de 6 puntos, en términos porcentuales se cuenta con una calificación global de 85.7%.

$$6 > 5$$

Expresando el resultado en términos porcentuales se obtiene

$$85.7\% > 71.42\%$$

Comparando el valor obtenido con el valor recomendado por la normativa, se puede concluir que se cuenta con un prototipo que genera nubes de puntos más que aceptable haciendo que el prototipo pueda ser indexado a una estación de escaneo 3D indexada al CIM.

Similitud de medidas

Durante la ejecución de las pruebas del escáner 3D indexadas al CIM se realizaron comparacion de medidas entre el modelo real y el modelo escaneado posprocesado, se utilizó la norma ISO 5725 que realiza un promedio del error de medidas. El promedio de error de medición obtenido es de 0.315 *mm*; la normativa establece que el error aceptable dependerá de la aplicación del sistema, ya que no se requiere medición de alta precisión el valor generado se puede considerar aceptable. Para poder cuantificar o comparar el valor del error se expresó en términos porcentuales, obteniendo un total de 99.65%.

$$99.65\% > 0.35\%$$

Mediante la comparación de los valores porcentuales se puede concluir que el 99.65% de las mediciones obtenidas mediante el escáner 3D están dentro de un rango aceptable de error en comparación con el modelo real, haciendo que el desempeño del escáner 3D indexado al CIM sea adecuado.

Validación

En la **Tabla 22** a continuación se presentan los índices porcentuales del desempeño del escáner en pruebas de similitud y medidas evaluados conforme a las normativas mencionadas.

Tabla 22

Comparación de índices porcentuales obtenidos en pruebas individuales e indexadas al CIM

Prueba	Índice Porcentual (H1)	Diferencia (H0)	H1>H0
Individuales/similitud estética	85.7%	14.3%	Si Cumple
Indexadas al CIM/similitud de medidas	99.65%	0.35%	Si Cumple

Mediante la comparación de los valores de índices porcentuales se consigue rechazar la hipótesis nula, corroborando la hipótesis alternativa. Por lo tanto, se puede establecer que:

Mediante el rediseño e implementación del escáner 3D ESPEL SI se podrá indexar al CIM como estación de escaneo 3D en el laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Latacunga

Validación de hipótesis general

La hipótesis general que se planteó para el proyecto es: ¿Mediante el diseño e implementación de un Sistema de Manufactura Integrada por Computador CIM con 4 estaciones de Manufactura Aditiva y Sustractiva, se podrá realizar Prácticas de Manufactura, en el Laboratorio CNC de la ESPE Sede Latacunga?

Variables de la hipótesis

Variable Independiente: Diseño e implementación de un Sistema de Manufactura Integrada por Computador CIM con 4 estaciones de Manufactura Aditiva y Sustractiva

Variable Dependiente: Ejecución de prácticas de Manufactura en el Laboratorio CNC de la ESPE Sede Latacunga.

De la misma manera que en la anterior validación, se realizarán pruebas sobre la variable independiente.

Método aplicado

Partiendo de la hipótesis planteada se puede definir H1 y H0, que representan el cumplimiento o nulidad de la hipótesis planteada.

Hipótesis alternativa (H1): Mediante el diseño e implementación de un Sistema de Manufactura Integrada por Computador CIM con 4 estaciones de Manufactura Aditiva y Sustractiva, **SI** se podrá realizar prácticas de Manufactura, en el Laboratorio CNC de la ESPE Sede Latacunga

Hipótesis nula (H0): Mediante el diseño e implementación de un Sistema de Manufactura Integrada por Computador CIM con 4 estaciones de Manufactura Aditiva y Sustractiva, **NO** se podrá realizar prácticas de Manufactura, en el Laboratorio CNC de la ESPE Sede Latacunga

Para validar la hipótesis se hizo uso de índices, se obtuvo una relación porcentual para conocer el desempeño de la estación de escaneo indexada al CIM en cada caso mencionado.

Uso de encuestas

Con el fin de comprobar la hipótesis general planteada, se realizaron prácticas de laboratorio junto a estudiantes de la carrera de ingeniería mecatrónica. Se adjunta la guía de laboratorio generada en el **Anexo G**, con el fin de realizar un seguimiento del desarrollo de las

prácticas, se aplicó una encuesta a los 46 estudiantes involucrados, en las encuestas se evidenció que la mayoría de los encuestados (97.8%) encontró la práctica en el CIM fácil de realizar y no experimentó mayores obstáculos o dificultades en su ejecución, un 100% de usuarios indicaron no haber presentado problemas para la configuración de la estación y un 100% de las prácticas culminaron con un resultado de experiencia satisfactoria para el usuario. En la **Tabla 23**, se plantearon y compararon los datos mediante el uso de índices porcentuales.

Tabla 23

Comparación de índices porcentuales obtenidos a través de aplicación de encuestas

Prueba	Índice Porcentual (H1)	Diferencia (H0)	H1>H0
Facilidad de ejecución de práctica	97.8%	2.2%	Si Cumple
Facilidad de configuración de estación	100%	0%	Si Cumple
Experiencia durante la práctica	100%	0%	Si Cumple

Mediante la comparación de índices se concluye que el sistema de manufactura integrada por computador CIM presenta un proceso sencillo para el usuario y una interfaz amigable de configuración, permitiendo el desarrollo de una práctica exitosa para el alumno; de esta manera se rechazó la hipótesis nula dando paso a la validación de la hipótesis alternativa que se planteó **Mediante el diseño e implementación de un Sistema de Manufactura Integrada por Computador CIM con 4 estaciones de Manufactura Aditiva y Sustractiva, SI se podrá realizar prácticas de Manufactura, en el Laboratorio CNC de la ESPE Sede Latacunga**

Análisis de costo vs. beneficio

El rediseño del escáner 3D como estación de escaneo indexada al CIM para prácticas en el laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga se ha implementado de manera satisfactoria, la estación cumple con los objetivos planteados desde el desempeño de funcionamiento de manera individual como indexada al CIM. Se debe probar que la inversión realizada en el desarrollo del proyecto se justifique con los resultados finales. En la ejecución del proyecto de rediseño se emplearon materiales como una PC, partes electrónicas, partes impresas en 3D y materiales varios. Los elementos se detallan en la **Tabla 24** a continuación.

Tabla 24

Costo de implementación de estación de escaneo 3D

Elemento	Cantidad	Precio
Laptop HP Pro Book Core i5	1	200.00
Módulo Laser lineal	1	10.00
Impresión 3D	-	15.00
Fondo de madera	1	20.00
Base de madera	1	25.00
Varios	1	80.00
	Total	350.00

La inversión realizada para la implementación de la estación de escaneo 3D es de \$350.00, este monto es justificado con los resultados obtenidos y presentados anteriormente. No es posible la comparación con una estación de escaneo 3D indexada al CIM ya que no hay registros de la implementación de este tipo de tecnologías en un sistema de manufactura integrada por computadora.

Capítulo IV

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Se rediseñó el escáner 3D rotativo con principios de triangulación laser del laboratorio de CNC en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga con el fin de su indexación en un sistema de manufactura integrada por computadora CIM mediante la aplicación de parámetros de rediseño basados en el protocolo de comunicación. Se establecieron parámetros de rediseño del escáner 3D con el fin de conseguir la implementación de una estación de escaneo 3D. Para el rediseño del sistema y selección de componentes se realizó la implementación de un nuevo controlador para el sistema en este caso una PC.

Para la estación de escaneo indexada al CIM se implementó un fondo de color negro con el fin de evitar medidas erróneas durante la ejecución de rutinas de escaneo, se acoplo una base debajo de la mesa de trabajo para tener una estación ubicada en un nivel de altura cercano a la mesa del manipulador robótico. Para facilitar la entrada del manipulador robótico a la estación de escaneo se utilizó una altura referencial entre las mesas de trabajo de la estación y el manipulador de 905 mm.

Para comprobar que las distancias entre mesas de trabajo y altura propuestas sean óptimas para el trabajo en un CIM se realizó una etapa de simulación. Las distancias no presentaron trayectorias difíciles o exigentes a realizar por el robot y no se detectaron colisiones.

Se realizaron pruebas individuales del escáner 3D rediseñado con un enfoque estético, se obtuvo una similitud de nube de puntos y modelo original del 85.7% evaluando criterios de color, brillo, forma y textura. El escáner permite al usuario una representación estética cercana a la del modelo original.

En las pruebas realizadas sobre la estación de escaneo 3D se pudo apreciar un error de medida entre sólido posprocesado y modelo original de 0.35% con modelos de geometría cilíndrica. La estación presenta altas prestaciones de escaneo, permitiendo al usuario una representación precisa al modelo original en cuanto a dimensiones.

Se obtuvo una conexión óptima entre la estación de escaneo 3D y el ordenador central mediante el uso de dos tópicos distintos con funciones de recepción de comandos en la estación de escaneo (tópico Test) y emisión de mensajes de estado al ordenador central (tópico Test1)

Para el uso del escáner como estación de escaneo en el CIM y con el fin de optimizar la comunicación y simplificar el intercambio de datos se implementó el uso de archivos de parámetros de calibración generales .JSON, permitiendo realizar escaneos de sólidos cilíndricos con errores en piezas pequeñas de 0.3 mm. El tiempo de escaneo fue optimizado gracias a la implementación de parámetros generales, permitiendo un tiempo de escaneo de alta calidad de 12 minutos 39 segundos a comparación del obtenido en el proyecto base que era de 39 minutos. La optimización del tiempo permite un proceso en el CIM mucho más fluido, con una duración de 14 minutos con 46 segundos independientemente del tamaño o complejidad de la pieza a trabajar.

La estación de escaneo 3D presenta una interfaz amigable con el usuario, de fácil configuración inicial y uso en general. Los resultados obtenidos en las encuestas demuestran que la estación de escaneo 3D indexada al CIM puede ser usada para prácticas en el laboratorio de CNC de la Universidad De Las Fuerzas Armadas ESPE Latacunga.

Recomendaciones

El porcentaje de error puede ser corregido aproximadamente un 0.14% de acuerdo con el autor del proyecto base, mediante el uso de funciones de calibración manuales con valores adaptados al entorno de escaneo.

En la comunicación entre la estación y el CIM la implementación de un tópico específico para publicación de mensajes de estado en el ordenador central y un tópico específico para la recepción de comandos en la estación es necesaria para tener un sistema de comunicación ordenado y una publicación enfocada en datos relevantes para la supervisión del CIM.

Usar una IP fija en el ordenador central de manera que, al momento de iniciar los programas, no sea necesario los cambios de parámetros de conexión con el bróker.

Con el fin de evitar errores de lectura de puertos COM, se recomienda siempre reiniciar la conexión de cables al puerto USB antes de iniciar el programa en las estaciones.

Realizar un seguimiento constante a los mensajes de estado emitidos por la estación, con el objetivo de verificar cada estado ejecutado a lo largo el escaneo.

Antes de iniciar la comunicación entre estaciones es muy importante verificar que todas las estaciones y ordenador central se encuentren conectado en la red CIM_Manufactura, ya que si se conectan en la red local de la universidad puede ocurrir una desconfiguración de los puertos de los ordenadores.

Bibliografía

- Acuña, F., Singaña, M., Acosta, N., & Caizalítín, E. (2014). Diseño e Implementación de una Celda de Manufactura Robotizada, para la Réplica de Piezas 3D, mediante fresado en el Laboratorio de Robótica Industrial de la ESPE-EL. *Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga*, 8, 18.
- Amaya-Zapata, S., Pulgar Velásquez, D., & Torres-Pardo, Í. D. (2016). Desarrollo e implementación de un sistema de visión artificial basado en lenguajes de uso libre para un sistema seleccionador de productos de un Centro Integrado de Manufactura (CIM). *Lámpsakos*, 15, 43–50.
- Armagard Ltd. (2020). *Computer-Integrated Manufacturing (CIM) Explained Clearly | Armagard Ltd.* <https://www.armagard.com/ip54/computer-integrated-manufacturing-explained-clearly.html>
- Balamurugan, S. (2021). CAD/CAM/CNC in Manufacturing-Current Trends in Manufacturing (System) Engineering. *CNC in Manufacturing-Current Trends in Manufacturing (System) Engineering (January 16, 2021)*.
- Beraldin, J. A., Blais, F., Cournoyer, L., Godin, G., Rioux, M., & Taylor, J. (2003). *Active 3D sensing*. Citeseer.
- Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992). Method for registration of 3-D shapes. *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*, 1611, 586–606.
- Chasiluisa, S., & Tapia, G. (2016). *Análisis de los parámetros del principio de triangulación mediante laser para el diseño y construcción de un Escáner 3D rotativo para el Laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPEL.
- Curless, B. (2017). From range scans to 3D models. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 33(4), 38–41.

- Ferreira, M., Moreira, A. P., & Neto, P. (2012). A low-cost laser scanning solution for flexible robotic cells: spray coating. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(9), 1031–1041.
- Groover, M. (2007). Fundamentos de manufactura moderna. Tercera edición. Ed. México, DF: *Mc Graw Hill*.
- Hodžić, D., Pandžić, A., Hajro, I., & Tasić, P. (2020). Strength comparison of FDM 3D printed PLA made by different manufacturers. *TEM J*, 9, 966–970.
- Junior, A. D. M. B., Neto, A. D. D., de Melo, J. D., & Goncalves, L. M. G. (2008). An adaptive learning approach for 3-D surface reconstruction from point clouds. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 19(6), 1130–1140.
- López Escogido, D. (2016). *Escáner 3D de alta precisión*.
- Phan, N. D. M., Quinsat, Y., Lavernhe, S., & Lartigue, C. (2018). Scanner path planning with the control of overlap for part inspection with an industrial robot. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(1), 629–643.
- Radhakrishnan, P., Subramanyan, S., & Raju, V. (2008). *CAD/CAM/CIM*. New Age International.
- Rando, T. (2002). *A State-of-the-Art Report of CAD/CAM/CIM Systems Technologies for the US Shipbuilding Industry*.
- Rusinkiewicz, S., & Levoy, M. (2000). QSplat: A multiresolution point rendering system for large meshes. *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 343–352.
- Tong, Y., Kucukdeger, E., Halper, J., Cesewski, E., Karakozoff, E., Haring, A. P., McIlvain, D., Singh, M., Khandelwal, N., Meholic, A., & others. (2019). Low-cost sensor-integrated 3D-printed personalized prosthetic hands for children with amniotic band syndrome: A case

study in sensing pressure distribution on an anatomical human-machine interface (AHMI) using 3D-printed conformal electrode arrays. *Plos One*, 14(3), e0214120.

Velázquez, E. S. P., Valdés, S. A. F., & Mejía, O. P. (2010). Modelado de una celda de manufactura integrada por computadora. *Conciencia Tecnológica*, 39, 23–30.

Zambrano-Rey, G. M., Parra-Rodríguez, C. A., Manrique-Torres, M. R., & Bustacara-Medina, C. J. (2007). Estación de control de calidad por visión artificial para un centro de manufactura integrada por computador (CIM). *Ingeniería y Universidad*, 11(1).

Anexos