



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes para
reconstrucción de modelos digitales 3D utilizando macrofotografía por apilamiento de
enfoco con cámaras DSLR**

Torres Carrión, Carlos Luis

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Msc. Gordón Garcés, Andrés Marcelo

18 de marzo el 2021

Latacunga



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“Diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes para reconstrucción de modelos digitales 3D utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR”** fue realizado por el señor: **Torres Carrión, Carlos Luis**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que los sustenten públicamente.

Latacunga, 18 de marzo del 2021



Firmado electrónicamente por:
**ANDRES MARCELO
GORDON GARCES**

Msc. Gordón Garcés, Andrés Marcelo

C.C.: 1803698800

Reporte de Urkund

Document Information

Analyzed document	Torres_Sistema_automático_de_captura_de_imágenes.pdf (D98856755)
Submitted	3/19/2021 9:14:00 AM
Submitted by	
Submitter email	cltorres1@espe.edu.ec
Similarity	7%
Analysis address	amgordon.espe@analysis.orkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/20725/1/T-ESPEL-MEC-0192.pdf Fetched: 3/19/2021 9:14:00 AM	 7
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS MAQUINA CNC PARA CIRCUITOS PCBS_2018-08-08.pdf Document TESIS MAQUINA CNC PARA CIRCUITOS PCBS_2018-08-08.pdf (D40776981) Submitted by: bhculqui@espe.edu.ec Receiver: bhculqui.espe@analysis.orkund.com	 2
W	URL: https://www.adobe.com/es/creativecloud/photography/discover/dslr-camera.html Fetched: 3/19/2021 9:14:00 AM	 1
W	URL: https://www.wemacro.com/?product=wemacro-rail Fetched: 3/19/2021 9:14:00 AM	 2
W	URL: https://www.bhphotovideo.com/c/product/1506437-REG/yongnuo_yn60mm_f2ne_mf_yn_60mm_... Fetched: 3/19/2021 9:14:00 AM	 2
W	URL: https://www.ni.com/es-cr/innovations/white-papers/11/displays-and-data-visualizati... Fetched: 3/19/2021 9:14:00 AM	 2
W	URL: https://grupoelectrostore.com/shop/cnc/tornillo-t8-2d8-400mm-8mm-1-hilo-pitch-2mm-... Fetched: 3/19/2021 9:14:00 AM	 2
W	URL: https://www.amazon.com/-/es/Tether-Tools-TetherPro-15-1-visibilidad/dp/B00827MK3S Fetched: 3/19/2021 9:14:00 AM	 2
W	URL: https://www.ebay.es/itm/Neewer-LCD-Mando-Intervalometro-Disparador-Remoto-MC-DC2-p... Fetched: 3/19/2021 9:14:00 AM	 2
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS_CARDENAS_DIAZ FINAL.pdf Document TESIS_CARDENAS_DIAZ FINAL.pdf (D43153455) Submitted by: jpcrdenasr@espe.edu.ec Receiver: amgordon.espe@analysis.orkund.com	 4
W	URL: https://www.dzoom.org.es/descubriendo-que-es-y-como-influye-el-circulo-de-confusio... Fetched: 3/19/2021 9:14:00 AM	 3

1/37



Firmado electrónicamente por:
**ANDRES MARCELO
GORDON GARCES**

Msc. Gordón Garcés, Andrés Marcelo

C.C.: 1803698800

Responsabilidad de autoría**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA****CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA****RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Torres Carrión, Carlos Luis**, con cédula de ciudadanía n° 1105919052, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes para reconstrucción de modelos digitales 3D utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR”**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo los requisitos teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 18 de marzo del 2021

Torres Carrión, Carlos Luis
C.C.: 1105919052

Autorización de publicación**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA****CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA****AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, **Torres Carrión, Carlos Luis**, con cédula de ciudadanía n° 1105919052, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación **“Diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes para reconstrucción de modelos digitales 3D utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 18 de marzo del 2021

Torres Carrión, Carlos Luis
C.C.: 1105919052

Dedicatoria

Dedico este trabajo a lo mejor que tengo en esta vida, mi madre que con amor y valentía me brinda su apoyo en la consecución de cada una de mis metas, mi esfuerzo y deseos de superación siempre llevan tu nombre.

A la memoria de mi mami Lola que me enseñó a querer sin límites y que todo siempre tiene un lado bueno.

Carlos Luis

Agradecimiento

A mi madre por el apoyo a lo largo de mi vida sabiendo orientarme a través de las dificultades, a mis tíos y familiares que con sus gestos de amor y bondad han sido un apoyo increíble a lo largo de mi vida.

Al ingeniero Andrés Gordón por su confianza y paciencia y por la excelente labor que realizó como docente y tutor.

A los amigos que se convirtieron en familia.

Carlos Luis Torres

Tabla de contenido

Portada.....	1
Certificación	2
Reporte de Urkund.....	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento.....	7
Tabla de contenido	8
Índice de tablas	12
Índice de figuras	14
Índice de ecuaciones.....	17
Resumen.....	18
Abstract	19
Fundamentación teórica	20
Generalidades.....	20
<i>Antecedentes.....</i>	20
<i>Planteamiento del problema</i>	21
<i>Descripción resumida del proyecto</i>	22
<i>Justificación e importancia</i>	23

	9
Objetivos	27
Objetivo general.	27
Objetivos específicos.	27
Hipótesis	28
Variables de investigación	28
Variable Independiente.	28
Variable Dependiente.	28
Reconstrucción tridimensional	29
Fotogrametría	31
Cámaras DSLR	33
Macrofotografía	35
Apilamiento de enfoque	37
Soluciones relacionadas	40
WeMacro	40
Stackshot	41
Carriles manuales	42
Diseño y selección de componentes del sistema	43
Definición de las necesidades	43
Diseño mecánico del sistema automático de captura de imágenes	46
Selección de piezas para carril de enfoque	46
Selección del diseño de guiado lineal para carril de enfoque.	46

	10
Selección del tornillo de potencia.	51
Selección de la tarjeta controladora del sistema.	56
<i>Selección de control para el sistema</i>	61
Selección del método de captura automático	65
<i>Selección de la apertura efectiva del diafragma</i>	70
Diseño del sistema de captura automático	72
Diseño final del sistema automático	74
Construcción del sistema	75
Construcción del sistema mecánico	75
<i>Manufactura</i>	75
Preparación del archivo digital.	76
Configuración de los parámetros de impresión.....	77
Retiro del material de soporte.....	77
<i>Ensamble de piezas</i>	78
Implementación del sistema electrónico y de control.....	79
<i>Ensamble del sistema electrónico</i>	79
Diseño del control mediante HMI.....	80
<i>Descripción de la programación</i>	82
<i>Cálculos del recorrido de los motores</i>	84
Análisis de costos del sistema	87
Pruebas y análisis de resultados	89

	11
Prueba de captura de imágenes	89
<i>Prueba de captura 1</i>	90
<i>Prueba de captura 2</i>	91
<i>Prueba de captura 3</i>	92
Prueba de apilamiento de imágenes	94
<i>Prueba de apilado 1</i>	94
<i>Prueba de apilado 2</i>	95
<i>Prueba de apilado 3</i>	96
Prueba de reconstrucción 3D	98
<i>Prueba de reconstrucción 3d 1</i>	98
<i>Prueba de reconstrucción 3d 2</i>	100
<i>Prueba de reconstrucción 3d 3</i>	101
Evaluación del sistema de reconstrucción 3D	102
Validación de hipótesis	103
Variable independiente:	103
Variable dependiente:	104
Conclusiones	108
Recomendaciones	110
Bibliografía	111
Anexos	117

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Descripción de necesidades</i>	44
Tabla 2 <i>Evaluación de la ponderación de criterios para diseño de carril de enfoque. ...</i>	49
Tabla 3 <i>Calificación de las alternativas para diseño de Carril de enfoque</i>	50
Tabla 4 <i>Calificación de las alternativas de acuerdo con la ponderación</i>	50
Tabla 5 <i>Evaluación de la ponderación de criterios para diseño del tornillo de potencia</i>	54
Tabla 6 <i>Calificación de las alternativas para diseño tornillo de potencia</i>	55
Tabla 7 <i>Calificación de las alternativas de acuerdo con la ponderación</i>	55
Tabla 8 <i>Evaluación de la ponderación de criterios para selección de la tarjeta de control</i>	59
Tabla 9 <i>Calificación de las alternativas para selección de la tarjeta de control</i>	59
Tabla 10 <i>Calificación de las alternativas de acuerdo con la ponderación</i>	60
Tabla 11 <i>Evaluación de la ponderación de criterios para selección</i>	63
Tabla 12 <i>Calificación de las alternativas para selección</i>	64
Tabla 13 <i>Calificación de las alternativas de acuerdo con la ponderación</i>	64
Tabla 14 <i>Evaluación de la ponderación de criterios para selección</i>	68
Tabla 15 <i>Calificación de las alternativas para selección</i>	69
Tabla 16 <i>Calificación de las alternativas de acuerdo con la ponderación</i>	69
Tabla 17 <i>Características de la impresora Comgrow Ender 3</i>	76
Tabla 18 <i>Costos de materiales y software</i>	87

	13
Tabla 19 <i>Prueba de captura 1</i>	90
Tabla 20 <i>Prueba de captura 2</i>	91
Tabla 21 <i>Prueba de captura 3</i>	93
Tabla 22 <i>Prueba de apilado 1</i>	94
Tabla 23 <i>Prueba de apilado 2</i>	95
Tabla 24 <i>Prueba de apilado 3</i>	97
Tabla 25 <i>Prueba de reconstrucción 3d 1</i>	99
Tabla 26 <i>Prueba de reconstrucción 3d 2</i>	100
Tabla 27 <i>Prueba de reconstrucción 3d 3</i>	101
Tabla 28 <i>Datos obtenidos de las pruebas</i>	104

Índice de figuras

Figura 1 Reconstrucción 3D de un anfiteatro Romano	32
Figura 2 Cámara DSLR.....	33
Figura 3 <i>Ejemplo de Macrofotografía</i>	35
Figura 4 <i>Proceso de apilamiento de enfoque</i>	39
Figura 5 <i>WeMacroRail</i>	41
Figura 6 <i>Stackshot Rail</i>	42
Figura 7 <i>NiSi Macro focusing Rail</i>	42
Figura 8 <i>Características del sensor de la cámara Nikon d7200</i>	45
Figura 9 <i>Objetivo YONGNUO YN60mm F2NE MF Macro Lens</i>	45
Figura 10 <i>Diseño con de rodamientos lineales y tornillos de potencia</i>	47
Figura 11 <i>Diseño con ruedas sobre perfil</i>	47
Figura 12 <i>Diseño con guías lineales</i>	48
Figura 13 <i>Calificación de las alternativas de diseño del carril de enfoque</i>	51
Figura 14 <i>T8 4 hilos pitch 2mm + tuerca</i>	52
Figura 15 <i>T8 1 hilos pitch 2mm + tuerca</i>	53
Figura 16 <i>Husillo de bolas 20 mm diámetro</i>	53
Figura 17 <i>Calificación de las alternativas de selección del tornillo de potencia</i>	56
Figura 18 <i>CNC Shield V3 para Arduino 1</i>	57
Figura 19 <i>Shield Ramps 1.4 para Arduino Mega</i>	57

	15
Figura 20 <i>Raspberry Pi CNC Board</i>	58
Figura 21 <i>Calificación de las alternativas de selección de la tarjeta de control</i>	60
Figura 22 <i>Ejemplo de HMI utilizando LabView</i>	61
Figura 23 <i>Pantalla Nextion TFT</i>	62
Figura 24 <i>Teclado matricial y Pantalla LCD</i>	63
Figura 25 <i>Calificación de las alternativas de selección HMI</i>	65
Figura 26 <i>Cable Marca Tether Tools</i>	66
Figura 27 <i>Intervalómetro para disparo de cámara</i>	67
Figura 28 <i>Infrarrojo ML-L3</i>	67
Figura 29 <i>Calificación de las alternativas de selección</i>	70
Figura 30 <i>Profundidad de campo en diferentes aperturas de diafragma</i>	71
Figura 31 <i>Difracción en diferentes aperturas de diafragma</i>	72
Figura 32 <i>Forma de onda led emisor IR</i>	73
Figura 33 <i>Circuito amplificador utilizado</i>	73
Figura 34 <i>Ensamble final</i>	74
Figura 35 <i>Comgrow Ender 3</i>	75
Figura 36 <i>Archivos STL a imprimir</i>	77
Figura 37 <i>Ensamblado parte mecánica</i>	78
Figura 38 <i>Montaje de prueba del sistema electrónico</i>	79
Figura 39 <i>Diseño gráfico de la Interfaz HMI</i>	80
Figura 40 <i>Indicadores de la Guía GEDIS</i>	81

	16
Figura 41 <i>Identificación de elementos a enviar al MCU</i>	82
Figura 42 <i>Diagrama de flujo de la programación del MCU</i>	83
Figura 43 <i>Explicación de la profundidad de Campo y el Círculo de Confusión</i>	84
Figura 44 <i>Dimensiones reales imagen Nikon d7200</i>	86
Figura 45 <i>Prueba de captura 1</i>	90
Figura 46 <i>Prueba de captura 2</i>	92
Figura 47 <i>Prueba de captura 3</i>	93
Figura 48 <i>Prueba de apilado 1</i>	94
Figura 49 <i>Prueba de apilado 2</i>	96
Figura 50 <i>Prueba de apilado 3</i>	97
Figura 51 <i>Prueba de reconstrucción 3d 1</i>	99
Figura 52 <i>Prueba de reconstrucción 3d 2</i>	101
Figura 53 <i>Prueba de reconstrucción 3d 3</i>	102
Figura 54 <i>Distribución de λ_2</i>	107

Índice de ecuaciones

Ecuación 1 Fórmula para el cálculo de la Profundidad de Campo.....	84
Ecuación 2 Fórmula para el cálculo del círculo de confusión.....	85
Ecuación 3 Fórmula para el cálculo del círculo de confusión para cámara Nikon APS-C	85
Ecuación 4 Fórmula para el cálculo del Ji-cuadrado	105

Resumen

El presente trabajo de titulación consiste en el diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes para reconstrucción de modelos digitales 3D utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR, este sistema permite, con objetos de hasta 20mm, deducir el número de fotografías necesarias para realizar un apilamiento de enfoque y realizar de forma automática tanto el movimiento de la cámara como la captura de la fotografía, esto, hasta obtener el número de imágenes calculadas según: la dimensión del objeto, la apertura del diafragma en el que se obtenga mayor nitidez con una profundidad de campo aceptable, el factor de magnificación y el círculo de confusión. Con estas imágenes se procede a realizar apilamiento de enfoque y posteriormente reconstrucción tridimensional mediante fotogrametría para obtener el modelo digital del objeto estudiado, su forma, color y textura. Para el correcto funcionamiento del sistema se requiere tener un espacio con una luz distribuida de manera uniforme sobre el objeto, la iluminación y todos los componentes son controlados por un HMI de manera que se tenga un proceso automático, cómodo para el usuario, estético y robusto. Para evaluar el sistema automático de captura de imágenes se realizaron pruebas de captura, apilamiento y de reconstrucción digital del modelo. La validación de la hipótesis planteada se realizó con el método estadístico de Ji-cuadrado.

Palabras clave:

- **APILAMIENTO DE ENFOQUE**
- **RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL**
- **MACROFOTOGRAFÍA**

Abstract

This degree work consists of the design and implementation of an automatic image capture system for the reconstruction of 3D digital models using focus stacking macrophotography with DSLR cameras, this system allows, with objects up to 20mm, to deduce the number of photographs necessary to perform a focus stacking and automatically perform both camera movement and photograph capture, this, until obtaining the number of images calculated according to: the dimension of the object, the aperture of the diaphragm in which it is obtained sharper with acceptable depth of field, magnification factor and circle of confusion. With these images, focus stacking is carried out and then three-dimensional reconstruction using photogrammetry to obtain the digital model of the object studied, its shape, color and texture. For the correct operation of the system, it is necessary to have a space with a light distributed evenly over the object, the lighting and all the components are controlled by an HMI so that there is an automatic process, comfortable for the user, aesthetic and robust. To evaluate the automatic image capture system, digital model capture, stacking and reconstruction tests were performed. The validation of the hypothesis was carried out with the Ji-square statistical method.

Keywords:

- **FOCUS STACKING**
- **THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION**
- **MACROPHOTOGRAPHY**

Capítulo 1

1. Fundamentación teórica

1.1 Generalidades

1.1.1 Antecedentes

La reconstrucción tridimensional es la generación automática o asistida de un modelo 3D que es una copia precisa de un objeto real. Cualquier método de reconstrucción 3D tiene algún tipo de dispositivo de captura, es decir, un dispositivo que obtiene formas y medidas del objeto. La complejidad de este proceso de software depende del dispositivo de captura utilizado. Los dispositivos de captura también determinan la precisión de los modelos.(Torres et al., 2012)

Cuando el objeto de estudio tiene detalles que son difíciles de apreciar a simple vista, el trabajo de reconstrucción tridimensional se dificulta y es necesario el uso de técnicas alternativas como la fotografía de aumento, en casos como por ejemplo el estudio de insectos, piezas de fabricación artesanal, joyería, artículos odontológicos, entre otros, que son difíciles de reproducir con un escáner de tamaño normal.

Escáneres 3D para este tipo de objetos no han tenido un amplio desarrollo, por lo que de tipo comercial solo se podría mencionar el escáner Artec Micro de la empresa Artec3D con un costo aproximado de \$29300 y como investigación se tiene un escáner desarrollado en la Universidad de Oviedo en el que se construye un prototipo funcional

para focus stacking (apilamiento de enfoque) y digitalización 3D en el que se muestra la digitalización parcial de una plaquita de corte. (Piñera Parrilla, 2017)

1.1.2 Planteamiento del problema

A lo largo de la historia se ha tenido la necesidad de replicar y reproducir de una u otra forma objetos de interés, y las formas de hacerlo han ido cambiando.

En la actualidad la evaluación de formas tridimensionales por distintos métodos juega un papel muy importante gracias a su naturaleza no invasiva y al amplio rango de campos de observación, resolución y precisión que ofrecen. Por esta razón es una herramienta importante actualmente utilizada en aplicaciones industriales. (Robayo et al., 2003)

La rápida evolución de los sistemas de fabricación y los ciclos de vida de los productos cada vez más cortos, sistemas diseñados por terceros de los cuales no se tenga los diseños originales, la necesidad de replicar objetos ya existentes, hace que la reconstrucción tridimensional se encuentre como una solución efectiva para este problema. (Parras et al., 2016)

Si se requiere estudiar objetos tales como piezas de maquetería, joyería, de producción artesanal, entre otros en los cuales los detalles no se pueden percibir fácilmente, se requiere técnicas que ayuden a la reconstrucción 3D de objetos de tamaño reducido.

Si los objetos a estudiar son relativamente pequeños como para que todo se pueda apreciar a simple vista, es necesario un equipo de fotografía que permita exponer pormenores que en otro momento se ignoran, aquí se puede mencionar al campo de fotografía denominado macrofotografía que es uno de los géneros más espectaculares porque revela detalles que incluso el ojo humano es incapaz de percibir. (Carrasco Jurado, 2017)

Para realizar reconstrucción 3D de objetos de tamaño reducido se requiere que el objeto estudiado por macrofotografía se encuentre completamente enfocado por este motivo se debe utilizar la técnica de apilamiento de enfoque para conseguirlo.

1.1.3 Descripción resumida del proyecto

En el presente proyecto se realizará una investigación y se recopilara información de los equipos que se deben utilizar, entre estos cámaras DSLR, lentes de macrofotografía, rieles micrométricos; así también las técnicas a utilizarse para la consecución de este, es decir, formas de reconstrucción tridimensional y la fundamentación teórica de la técnica de apilamiento de enfoque.

Las dimensiones de los objetos que podrán ser estudiados en el sistema se delimitarán una vez concluida la fase de investigación de los equipos a utilizarse, sin embargo, se plantea que estos deben tener unas dimensiones de aproximadamente entre 1cm hasta 4cm, determinándose de esta manera la distancia mínima de enfoque que se pueda conseguir sin sacrificar el plano de toma de fotografía.

Se realizará el diseño de la estructura del sistema automático de captura de imágenes con cámaras DSLR, delimitando el tamaño de la estructura por la distancia mínima de enfoque y tamaño de las muestras seleccionadas.

Se requiere diseñar la parte electrónica del control del sistema automático de captura de imágenes, acorde al diseño de la estructura mecánica y de acuerdo a los equipos seleccionados en la fase de investigación.

Una vez que se haya realizado las capturas requeridas se procede a realizar apilamiento de enfoque con cada uno de los planos y generar las imágenes plenamente enfocadas del objeto.

Para realizar la reconstrucción tridimensional se utilizará un software que permita realizar fotogrametría, utilizando las fotografías previamente obtenidas después de realizar la técnica de apilamiento de enfoque, para obtener como resultado información 3D del objeto seleccionado para el estudio tanto en su forma como en su textura.

Por último, se realizarán pruebas de reconstrucción tridimensional, utilizando el sistema automático de captura de imágenes, con objetos entre los cuales se podrían encontrar artesanías, insectos, piezas o componentes mecánicos, entre otros, para de esta manera verificar el cumplimiento de la hipótesis planteada.

1.1.4 Justificación e importancia

En la actualidad la evaluación de formas tridimensionales por distintos métodos juega un papel muy importante gracias a su naturaleza no invasiva y al amplio rango de campos de observación, resolución y precisión que ofrecen. Por esta razón es una herramienta importante actualmente utilizada en aplicaciones industriales. (Robayo et al., 2003)

Por lo tanto, en el presente proyecto se intenta resolver los problemas que acarrea la reconstrucción tridimensional de objetos de tamaño reducido utilizando para esto fotografía de gran aumento, solucionando mediante la técnica de apilamiento de enfoque la poca profundidad de campo con la que se trabaja en la macrofotografía. (Santos, 2015)

Cuando se toma una fotografía se obtiene una toma de un plano que es paralelo al sensor de la cámara donde se encuentra una zona enfocada, hay una zona más cercana y lejana que tienen una nitidez aceptable, esta zona se denomina profundidad de campo, es la zona que se muestra nítida en una imagen. (Birkitt, 1999)

En macrofotografía se trabaja la mayoría de las ocasiones a distancias extremadamente cortas y con objetivos tipo tele de manera que la profundidad de campo llega a valores en distancia muy reducidos y enfoques muy críticos. (Nieto, 2012)

El objetivo de utilizar la técnica de macrofotografía es que el primer plano del sujeto este nítido, enfocando a corta distancia esto resulta en que la profundidad de campo se reduce logrando que el sujeto se aisle del fondo de forma que se destaque. (Nates, 2014)

En macrofotografía que el sujeto en primer plano este nítido por completo puede resultar complicado teniendo en cuenta la escasa profundidad de campo con la que se juega, si esta distancia no es suficiente hay maneras para que pueda aumentar.

Una forma de aumentar la distancia enfocada es cerrar el diafragma, pero con esto se produce un efecto llamado difracción que como menciona (Birkitt, 1999), es cuando las ondas de luz se dispersan al pasar por un orificio demasiado estrecho y el sensor de la cámara recibirá la luz de manera distorsionada, produciendo pérdida de nitidez.

Otra forma de aumentar la profundidad de campo sería alejarse del sujeto o hacer lo mismo cambiando el tipo de objetivo, es decir, pasar de trabajar con un teleobjetivo a un objetivo angular, con esto se aumenta la distancia enfocada, pero se pierde el objetivo de tener un primer plano con acercamiento.

Si las alternativas anteriores no dan los resultados deseados existe una técnica para ampliar la profundidad de campo que se denomina apilamiento de enfoque, en la que se utiliza el objetivo en su punto de mayor nitidez para realizar una serie de fotografías en las que se cambia el plano de enfoque intentando solapar entre cada toma, y de esa manera aumentar lo más posible la profundidad de campo.

Existen dos técnicas con las que se puede realizar la técnica de apilamiento de enfoque, una se trata de mover el anillo de enfoque en pasos pequeños, uno por cada fotografía y otra en la que se sitúa la cámara en un carril de avance manual para variar

la distancia al sujeto. (Moya, 2015)

Cabe recalcar que mediante los métodos tradicionales de reconstrucción tridimensional únicamente se puede obtener la forma del objeto, mientras tanto, con la propuesta planteada en el proyecto se pretende extraer además de su forma, información de su textura.

En el Plan Nacional de Desarrollo se mencionan propuestas para la protección del patrimonio cultural y natural, la promoción de la identidad ecuatoriana, además la promoción de industrias culturales, así mismo en las políticas en el punto 5.2 se enfoca en promover la productividad y calidad de los productos nacionales, para generar valor agregado y procesos de industrialización en los sectores productivos para satisfacer la demanda nacional y de exportación. (Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021-Toda una Vida, 2017)

En consecuencia, para satisfacer los planteamientos del PND “Toda una Vida”, el sistema automático de captura de imágenes planteado en el proyecto se enfocaría en la reproducción de objetos de tamaño reducido que podrían formar parte de una producción natural y cultural, y que se conozcan de manera didáctica, todo esto con la interacción de los diferentes ámbitos del desarrollo del país.

1.1.5 Objetivos

1.1.5.1 Objetivo general.

- Diseñar e implementar un sistema automático de captura de imágenes para reconstrucción de modelos digitales 3d utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR.

1.1.5.2 Objetivos específicos.

- Investigar y recopilar información de los equipos a utilizarse en el sistema automático de captura de imágenes, además de la fundamentación teórica de las técnicas de reconstrucción tridimensional y la técnica de apilamiento de enfoque, para delimitar los equipos a utilizar y determinar el tamaño de los objetos a estudiarse.
- Diseñar la parte mecánica y electrónica del sistema automático de captura de imágenes, para reconstruir modelos digitales 3D utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR.
- Utilizar la técnica de apilamiento de enfoque para generar imágenes plenamente nítidas del objeto de estudio.
- Realizar la reconstrucción tridimensional utilizando un software que permita realizar fotogrametría, para obtener la reconstrucción 3D de objetos seleccionados para el estudio.

- Realizar pruebas de reconstrucción tridimensional, utilizando el sistema automático de captura de imágenes.

1.1.6 Hipótesis

¿El diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes permitirá la reconstrucción de modelos digitales 3d utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR?

1.1.7 Variables de investigación

Para el proyecto de investigación se aplicará las variables como son: variables dependientes y variables independientes.

1.1.7.1 Variable Independiente.

- Sistema automático de captura de imágenes.

1.1.7.2 Variable Dependiente.

- Reconstrucción de modelos digitales 3D utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR.

1.2 Reconstrucción tridimensional

La reconstrucción tridimensional ha sido un tema popular de investigación desde hace mucho tiempo, de hecho, se ha logrado alcances importantes desde los primeros días. (Moons et al., 2009)

Las nuevas tecnologías analíticas como escaneo láser tridimensional y la microscopía de alta resolución han facilitado la ingeniería inversa, pero aún queda mucho por aprender. (Wang, 2010)

En múltiples épocas ha existido la necesidad de replicar objetos reales de una u otra forma, las formas de hacerlo han ido variando a lo largo de la historia, en los últimos años la evaluación de formas tridimensionales ha aumentado debido a su naturaleza no invasiva.

Después de pasar por etapas de diseño y la creación de objetos se crea la necesidad de crear modelos digitales de objetos diseñados por otras personas, objetos comerciales de los cuales no se tiene el diseño para piezas de recambio, preservación de modelos naturales, entre otros. En estos casos se tiene que recurrir a la reconstrucción tridimensional mediante escáneres 3D.

Un escáner 3D es un aparato capaz de capturar la forma y características físicas de un objeto real existente a base de explorar su superficie y tomar medidas en ella respecto a unos puntos de referencia. (Parras et al., 2016)

Como se menciona en la investigación de (Cristina et al., 2007) los escáneres 3D se dividen en dos grupos según su característica de digitalización: por contacto y sin contacto.

Los sistemas de digitalización por contacto son los más antiguos. En la actualidad se utilizan principalmente para verificación dimensional de piezas industriales para el control de calidad. Con estos sistemas se obtienen las coordenadas de los puntos gracias al desplazamiento de una punta sobre la superficie a digitalizar. (Cristina et al., 2007)

Los sistemas de digitalización sin contacto se subdividen en activos y pasivos. Los pasivos no emiten ninguna clase de radiación, en su lugar refleja la radiación reflejada por el ambiente, otros pueden utilizar la radiación infrarroja, de tipo estereoscópicos o de tipo fotogramétrico. Los activos son aquellos que emiten algún tipo de señal (electromagnéticas, haz de luz, ondas de radio, rayos X o ultrasonidos), la cual sirve para la construcción geométrica de un objeto. (Del Castillo Vivanco et al., 2018)

Por el tipo del presente proyecto se utilizará el sistema de digitalización sin contacto de tipo pasivo utilizando fotogrametría.

El tipo de escaneo 3D basado en fotogrametría es similar a la metodología de una fotografía panorámica, excepto que se toma de forma circundante a un solo objeto en un espacio de tres dimensiones. (Ebrahim, 2014)

Para una correcta ejecución de la técnica de fotogrametría se tiene en cuenta algunas claves como: siempre utilizar imágenes completamente nítidas y enfocadas, no escanear objetos pequeños, los objetos no deben ser traslúcidos. (Martínez Ceniceros, 2017)

Para solucionar los problemas de nitidez que se puedan presentar escaneando objetos pequeños en la presente investigación se utilizará una cámara de DSLR y óptica de tipo macro juntamente con la técnica de apilamiento de enfoque.

1.2.1 Fotogrametría

La fotogrametría es una técnica que permite realizar medidas 3D y obtener volúmenes a partir de fotografías. Esta técnica ha sido tradicionalmente empleada en la creación de mapas y su correspondiente levantamiento en 3D. Sin embargo, hoy en día, el aumento de potencia de sistemas y la mejora en los algoritmos de reconocimiento de patrones en imágenes digitales ha hecho posible que esta técnica se incorpore con más fuerza para la generación de modelos tridimensionales. (L.Caro, 2012)

Figura 1

Reconstrucción 3D de un anfiteatro Romano



Nota. En el gráfico se muestra una reconstrucción de un anfiteatro romano. (Balawat *Diseño Arqueología y Patrimonio Cultural*, 2020)

Las técnicas fotogramétricas, en lo que refiere a sus bases matemáticas, son conocidas hace bastante tiempo, siendo empleadas en vuelos, reconstrucciones de paisaje, etc. Se fundamentan en la toma de proyecciones de la realidad (fotografías), desde dos perspectivas a partir de las cuales se podía realizar una composición que proporcionaba una visión cuasi tridimensional. (L.Caro, 2012)

Actualmente, usando la fotografía digital podemos calcular una estimación de la posición de la cámara respecto al objeto real y obtener, mediante transformaciones matemáticas, la posición relativa de sus puntos en un sistema 3D. (Longuet-Higgins, 1981)

Es más, incluso desde un sistema de imágenes digitales tomadas con una cámara y objetivos no calibrados, es posible, siempre que mantengamos los mismos parámetros en la toma fotográfica, reconstruir un modelo 3D con muchas garantías.

Este modelo generado, si bien no posee medidas reales, si posee medidas relativas que pueden ser transformadas a medidas reales. (L.Caro, 2012)

1.3 Cámaras DSLR

DSLR es un término que se ha convertido en un sinónimo de las cámaras digitales, pero una cámara réflex digital de un solo objetivo (destacable por admitir objetivos intercambiables en el mismo cuerpo de la cámara) es tan solo un tipo de cámara digital. (Adobe.com, 2020)

Figura 2

Cámara DSLR



Nota. En el gráfico se muestra una cámara DSLR Nikon d7200.(Nikon | Imaging Products | Nikon D7200, 2021)

Estas cámaras se conocen como de SLR porque cuentan con una sola lente que sirve para enfocar la imagen y para que el fotógrafo pueda verla a través del visor. La

lente tiene la función de enfocar la imagen sobre un sensor electrónico que capta la imagen. El sensor se encuentra detrás de un espejo que debe levantarse para que el rayo de luz incide sobre él. Este espejo permite reflejar la imagen al visor para que el fotógrafo pueda verla antes de realizar el disparo. El funcionamiento es el mismo que el de una antigua cámara réflex en la que la película sido sustituida por un sensor electrónico. (Chango Collaguazo & Domínguez Álvarez, 2011)

Gracias a las cámaras digitales, la fotografía nunca ha sido tan popular o accesible. Incluso las cámaras de nuestros teléfonos móviles son capaces de capturar imágenes de buena calidad, y muchas también tienen una excelente capacidad de enfoque cercano que las hace adecuadas para fotografiar objetos en miniatura cercanos. Las cámaras compactas y las cámaras puente pueden enfocar sujetos cercanos sin el uso de accesorios.

Hoy en día, es realmente posible capturar grandes primeros planos en cualquier momento y lugar. Sin embargo, para los entusiastas de los primeros planos, un sistema SLR digital es la mejor opción, ya que proporciona a los fotógrafos la mayor versatilidad, velocidad, calidad de imagen y nivel de control. (Hoddinott, 2013)

Para la aplicación de esta investigación se requiere un lente que pueda enfocar a distancias muy cortas, con una ampliación que se denomina 1:1, esto es entrar al campo de la macrofotografía.

1.4 Macrofotografía

La fotografía es un lenguaje, una técnica y un arte. Es un modo de captar y exponer gráficamente la realidad visual. Cada foto es un fragmento, un recorte de realidad interpretada con nuestra mirada a través de la cámara. El ser humano cuando percibe una imagen suele hacerlo de una determinada forma y en un determinado orden; además, existen ciertos aspectos en una imagen que ayudan a captar en general la atención del cerebro y que suelen evocar ciertas sensaciones o sentimientos. (Silva Oquendo, 2011)

Figura 3

Ejemplo de Macrofotografía



Nota. En el gráfico se muestra macrofotografía de una abeja.

El término macrofotografía tiene una definición más estricta, generalmente se utiliza para fotografías en las que el sujeto se reproduce con un aumento de tamaño natural 1x o superior. Los aumentos de hasta alrededor de 4x o 5x son relativamente

accesibles con las cámaras réflex digitales de lente única (DSLR) equipadas con lentes y accesorios adecuados. Más allá de eso, puede ser necesario utilizar microscopios y conjuntos ópticos de banco especiales. (Davies, 2010)

Macro generalmente significa cualquier foto que sea 1: 1 (1x) o mayor a 1: 1 indica que la imagen en el sensor es del mismo tamaño que la imagen en vivo. Si es igual o mayor, es una macro. (Erlewine, 2011)

Con el concepto descrito anteriormente se entiende por macrofotografía al tipo de fotografía en las que el sujeto fotografiado ocupa al menos el tamaño del sensor o de mayor magnitud.

El modo macro no es una característica de la cámara con que se capture la fotografía sino más bien del lente utilizado, por experiencia de uso con lentes de fotografía no especiales al acercarse al sujeto de interés se pierde el enfoque, los objetivos macro solucionan el problema del enfoque en distancias muy cortas.

En un plano de enfoque en cada foto y las áreas delante y detrás de ese plano que también están en un "enfoque aceptable" constituyen la profundidad de campo, que puede ser muy superficial o profunda. Obviamente, una lente configurada al infinito que dispara un paisaje tiene una profundidad de campo muy amplia, mientras que, en general, un primer plano enfocado con lente tiene una profundidad de campo más superficial. (Erlewine, 2011)

Mientras ha existido cámaras y lentes, los fotógrafos han luchado por lograr una mayor profundidad de campo (DOF). Cuando una lente tiene un diafragma completamente abierto, la profundidad de campo es muy limitada, lo que significa que, en el mejor de los casos, puede esperar tener un enfoque nítido solo en un pequeño plano de la foto. El resto del encuadre estará más o menos desenfocado. Con lentes extremadamente abiertos ($f / 1.4$, $f / 1.8$), la profundidad de campo puede ser muy fina. Todo lo demás está fuera de foco. (Erlewine, 2011)

A medida que se cierra el diafragma se logra una profundidad de campo cada vez mayor hasta que se alcanza un punto donde los efectos de difracción se evidencian y comienzan a destruir la nitidez general de la foto. Los fotógrafos están atrapados por casi nada de profundidad de campo en aperturas amplias y una pérdida de nitidez en aperturas estrechas. Ese es un problema tradicional. (Erlewine, 2011)

En las fotos que tienen una gran profundidad de campo con primeros planos es posible que se haya utilizado la técnica de apilamiento de enfoque.

1.4.1 Apilamiento de enfoque

Con la fotogrametría es posible obtener puntos tridimensionales a partir de imágenes bidimensionales del objeto que se requiere digitalizar.

El apilamiento de enfoque es una técnica de combinación de imágenes, diseñada para ampliar la profundidad del campo. En pocas palabras, el fotógrafo toma una secuencia de imágenes, cada una capturada a diferentes profundidades focales, y

luego las fusiona usando un software. En principio, no es diferente a la fotografía de alto rango dinámico (HDR), solo la idea del apilamiento de enfoque es extender la nitidez de atrás hacia adelante, en lugar del rango dinámico. El apilamiento de enfoque es particularmente útil para la fotografía macro, donde la profundidad de campo suele ser muy restringida.

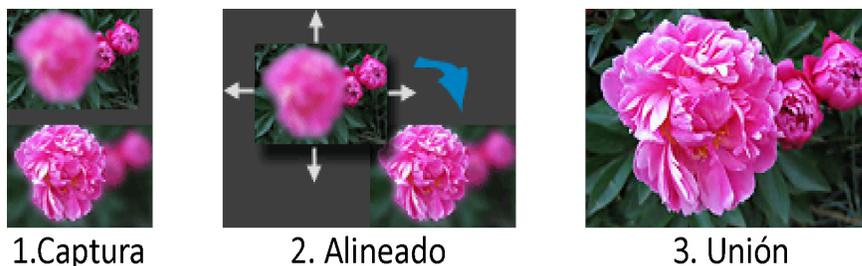
Es muy útil cuando incluso aumentando el valor del diafragma es insuficiente para enfocar todo, además que supera la inevitable pérdida de nitidez por difracción. (McHugh, 2020)

El apilamiento de enfoque funciona en tres etapas generales:

- Se toman varias fotografías aumentando gradualmente la distancia de enfoque en el sujeto, se debe evitar movimiento del objeto.
- Las fotos tomadas en el paso anterior se alinean para que su contenido se superponga píxel a píxel, este paso es necesario incluso cuando se usa trípode porque cambiar la distancia de enfoque siempre causa desalineación
- Se crea una imagen compuesta basada en las regiones más nítidas de cada una de las fotos separadas.

Figura 4

Proceso de apilamiento de enfoque



Nota. En el gráfico se muestra un ejemplo de las etapas de apilamiento de enfoque.

(McHugh, 2020)

Las imágenes con diferentes distancias focales se pueden tomar con varios métodos. Como primer método la cámara se fija en un trípode y la distancia de enfoque se puede ir cambiando manualmente girando el anillo de enfoque. Se requiere enfocar el punto más cercano y lejano para estimar los límites en la distancia de enfoque. En segunda distancia de enfoque se puede cambiar cuando la cámara se mueve sobre un eje fijo, por ejemplo, cuando se ocupa un riel micrométrico. (Kontogianni et al., 2017)

Se han desarrollado muchos algoritmos y métodos para crear una imagen enfocada apiladas. Éstas se basan en tres métodos básicamente. (Kontogianni et al., 2017)

- Enfoque piramidal: utiliza un método de descomposición piramidal de imagen dividiendo la señal en alta y baja frecuencia, este método da buenos resultados en casos complejos, aunque aumenta el contraste y el brillo.

- El enfoque del mapa de profundidad: el método selecciona el píxel más nítido de la imagen de origen y utiliza esta información para reconstruir el mapa de profundidad. En este método las imágenes deben tomarse en orden consecutivo de adelante hacia atrás o viceversa.
- El enfoque del peso de píxel: este método calcula un peso para cada píxel en función de su contraste en el conjunto de imágenes y luego forma un promedio de todas las imágenes. Este enfoque funciona mejor en pequeños apilados y conserva el contraste y el color.

1.5 Soluciones relacionadas

En el mercado existen de forma comercial soluciones parciales a la problemática presentada, siendo estas enfocadas al apilamiento de enfoque utilizando carriles micrométricos, aunque en el país no se pueda conseguir estos desarrollos fácilmente, los citados a continuación son los más presentes a nivel global.

1.5.1 WeMacro

Esta solución comercial ronda los 300 dólares y dispone de un movimiento controlado en un eje con un motor a pasos, con un control por cable del obturador.

Figura 5*WeMacroRail*

Nota. En el gráfico se muestra una solución comercial para focus stacking de la marca WeMacro. (*WeMacro rail (100mm type, with power bank cable for outside) – Wemacro Rail, 2016*)

1.5.2 Stackshot

El sistema de la empresa Cognisys es el más completo para captura de fotografías en un eje a un costo aproximado de 799 dólares, cuenta con movimiento controlado en un eje y se puede agregar por un costo adicional un controlador por cable del obturador.

Figura 6*Stackshot Rail*

Nota. En el gráfico se muestra una solución comercial para focus stacking de la marca StackShot. (*StackShot Macro Rail Package*, 2020)

1.5.3 Carriles manuales

Un buen ejemplo de carril manual es el presentado por la marca NiSi, es el mejor vendido de la web dedicada a fotografía bhphotovideo.com, a un costo aproximado de 129 dólares, facilita el movimiento con medidas en un eje.

Figura 7*NiSi Macro focusing Rail*

Nota. En el gráfico se muestra una solución para el apilamiento de enfoque de forma manual. (*NiSi Macro Focusing Rail*, 2021)

Capítulo 2

2. Diseño y selección de componentes del sistema

En este capítulo se van a explicar las limitantes para el diseño y selección de componentes del sistema automático de captura de imágenes, estas serán analizadas mediante el método de Pugh que es un proceso sistemático de selección de la mejor alternativa de diseño que utiliza de manera conjunta todos los posibles criterios de evaluación implicados. Para ello hay que especificar dichos criterios, asignarles una importancia relativa y comparar las alternativas en cada criterio. El resultado final es una valoración ponderada de todas las alternativas. (Instituto de Biomecánica de Valencia, 2001)

2.1 Definición de las necesidades

El proceso de la definición de las necesidades es una etapa fundamental para el diseño y su posterior desarrollo, estas características y especificaciones técnicas pueden ser por medio de peticiones del cliente, requerimientos del diseñador o estudio de mercado.

Las necesidades planteadas por el usuario y el diseñador se presentan enumeradas en la tabla, son definidas en el proceso del diseño conceptual visualizando el funcionamiento general del sistema automático de captura de imágenes.

Tabla 1*Descripción de necesidades*

Concepto	#	Necesidad
Función	1	Movimientos precisos
	2	Disparador automático a distancia
Control	3	Cómodo para el usuario
	4	Visualización del proceso
	5	Inicie con un botón
Construcción	6	Mínimas vibraciones
	7	Estético y robusto
	8	Fácil ensamblaje
	9	Fácil de transportar e instalar
Costo	1	Costos bajos

Nota. En la tabla las necesidades para el diseño del sistema de captura automático.

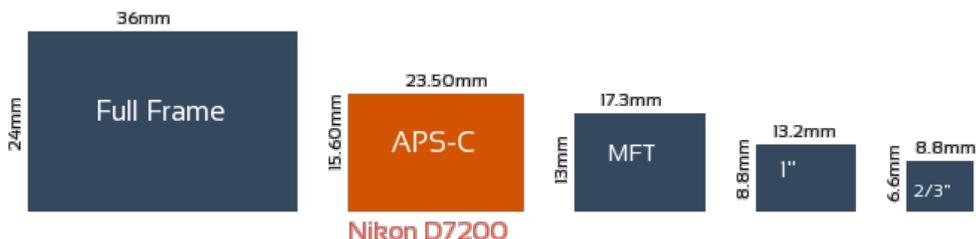
Los requerimientos para la automatización de un sistema que realice apilamiento de enfoque, es que exista desplazamientos controlados que están delimitados en distancia por los elementos a utilizar, lo primero para tener en cuenta es la cámara de fotos que en este caso será una Nikon d7200 con un sensor APS-C de 23.5mm de largo y 15.6mm de alto como se muestra en la Figura 8.

Uno de los requerimientos principales es que el objetivo a utilizar tenga un factor de magnificación de al menos 1:1, lo que se considera como macro real.

(Canonistas.com, 2018)

Figura 8

Características del sensor de la cámara Nikon d7200



Nota. En el gráfico se muestra las dimensiones del sensor de la cámara utilizada.

El objetivo para comprar por el costo y facilidad de adquisición es YONGNUO YN60mm F2NE MF Macro Lens como se muestra en la Figura 9, entre sus características está que posee un macro real, una distancia mínima de enfoque de 23.4 cm, enfoque manual y las aperturas extremas en el diafragma son de f2 y de f16 cuando están en su punto más abierto y cerrado respectivamente.

Figura 9

Objetivo YONGNUO YN60mm F2NE MF Macro Lens



Nota. En el gráfico se muestra el objetivo utilizado en el sistema de automático de captura de imágenes. (Yongnuo YN 60mm f/2 NE MF Lens for Nikon F, 2020)

Con los elementos descritos anteriormente se puede delimitar las dimensiones de los objetos de estudio al 85% del tamaño del sensor, resultando las unas medidas de 20mm de largo y 13mm de alto.

2.2 Diseño mecánico del sistema automático de captura de imágenes

2.2.1 Selección de piezas para carril de enfoque

Para el movimiento del plato donde va a estar la cámara se analizaron algunos diseños en los que no se considera la transmisión por bandas debido al inminente cambio a corto plazo por causa de estiramientos o cortes, se barajan diseños con tornillo de potencia, se utilizarán motores a pasos por su facilidad de control de posición.

2.2.1.1 Selección del diseño de guiado lineal para carril de enfoque.

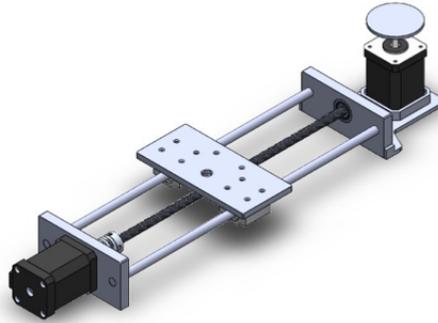
En el mercado nacional se encuentran disponibles con mayor o menor facilidad algunas alternativas válidas en el diseño del carril de enfoque, entre las alternativas consideradas están:

Alternativa 1: Rodamientos lineales con tornillo de potencia

El diseño con rodamientos lineales y tornillos de potencia tiene elementos relativamente fáciles de conseguir, con una considerable calidad en la transmisión de movimiento, uno de sus puntos en contra es la necesidad de elementos externos para que las piezas se mantengan alineadas.

Figura 10

Diseño con de rodamientos lineales y tornillos de potencia



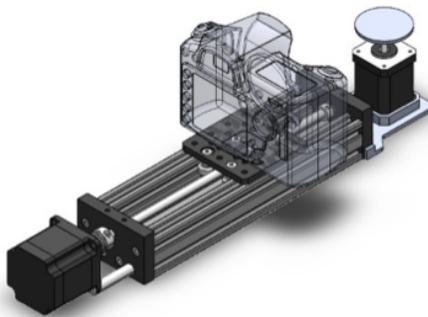
Nota. En el gráfico se muestra el primer diseño con rodamientos lineales.

Alternativa 2: Ruedas sobre perfil con tornillo de potencia

Se considera un perfil de aluminio con ruedas para la transmisión del movimiento, con piezas comerciales, considerando que es la de más fácil montaje y no tan elevado coste de adquisición.

Figura 11

Diseño con ruedas sobre perfil



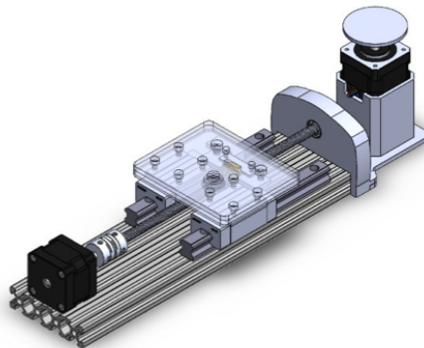
Nota. En el gráfico se muestra en segundo diseño de ruedas sobre un perfil.

Alternativa 3: Guías lineales con tornillo de potencia

El diseño con guías lineales es el que tiene mejores referencias prácticamente eliminando la holgura entre los componentes de transmisión de movimiento, tiene en contra que sus elementos son los más escasos en el mercado a comparación de las demás alternativas.

Figura 12

Diseño con guías lineales



Nota. En el gráfico se muestra el tercer diseño con guías lineales.

Entre los criterios más importantes para el diseño del carril de enfoque se encuentra la holgura, es el criterio con más importancia teniendo en cuenta que un sistema estable va a minimizar las vibraciones del sensor de la cámara, estas vibraciones en profundidades de campo cortas pueden ser las causantes de la falta de nitidez, además de esta los demás criterios que se han tomado en cuenta para la selección del diseño el carril de enfoque son: implementación, costo, disponibilidad.

En la Tabla 2 se detallan los criterios de evaluación para el diseño del carril de enfoque con su ponderación respectiva también detallada a continuación.

Holgura>Implementación>Disponibilidad>Costo

Tabla 2

Evaluación de la ponderación de criterios para diseño de carril de enfoque.

Criterio	Holgura	Implementación	Disponibilidad	Costo	$\Sigma +1$	Ponderación
Holgura	-	1	1	1	4	40%
Implementación	0	-	1	1	3	30%
Disponibilidad	0	0	-	0,5	1,5	15%
Costo	0	0	0,5	-	1,5	15%
				Total	10	100%

Nota. En la tabla se muestra la importancia de los criterios de selección.

En la Tabla 3 se realiza una valoración de las alternativas con respecto a los criterios de evaluación, si son 3 alternativas, numerando del 1 al 3 del peor al mejor respectivamente.

Tabla 3

Calificación de las alternativas para diseño de Carril de enfoque

Alternativas	Holgura	Implementación	Disponibilidad	Costo
Rodamientos lineales	2	1	2	3
Ruedas sobre perfil	1	3	3	2
Guías lineales	3	2	1	1
Σ	6	6	6	6

Nota. En la tabla se muestra la calificación de las alternativas de acuerdo a los puntajes establecidos.

Tabla 4

Calificación de las alternativas de acuerdo con la ponderación

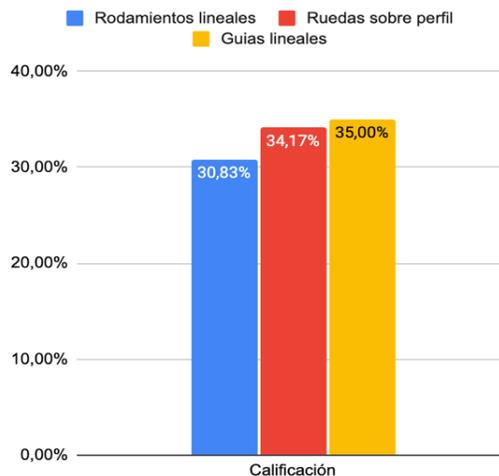
Alternativas	Holgura	Implementación	Disponibilidad	Costo	Calificación
Rodamientos lineales	13,33%	5,00%	5,00%	7,50%	30,83%
Ruedas sobre perfil	6,67%	15,00%	7,50%	5,00%	34,17%
Guías lineales	20,00%	10,00%	2,50%	2,50%	35,00%
					100,00%

Nota. En la tabla se muestra los porcentajes obtenidos por las alternativas.

La alternativa con mejor puntaje es la de las guías lineales con un 35% como se puede observar en la Figura 13, teniendo la prioridad y serán las utilizadas en el diseño del carril de enfoque.

Figura 13

Calificación de las alternativas de diseño del carril de enfoque



Nota. En el gráfico se muestra la alternativa ganadora.

Después de haber elegido como parte del diseño base del carril de enfoque las guías lineales se tienen algunas opciones existentes en el mercado en cuanto a los tornillos de potencia, estos son muy importantes teniendo en cuenta la aplicación a la que están orientados, y de acuerdo a sus características se define la rapidez del movimiento y la precisión del desplazamiento.

2.2.1.2 Selección del tornillo de potencia.

Entre las características a tener en cuenta en la selección del tornillo de potencia se encuentra según la descripción de necesidades que exista un movimiento preciso para la realización exitosa de la técnica de apilamiento de enfoque. Para la selección de alternativas se tienen en cuenta las existentes en el mercado, normalmente utilizadas en máquinas CNC.

Alternativa 1: Tornillo Sin Fin 8mm De 4 Entradas 2mm de paso con tuerca trapezoidal.

Esta alternativa es la de más fácil adquisición tanto por su costo como por su disponibilidad.

Figura 14

T8 4 hilos pitch 2mm + tuerca



Nota. En el gráfico se muestra un tornillo T8 4 hilos. (*Tornillo Sin Fin 8mm 4 Entradas 400mm Largo+tuerca+camisa | Mercado Libre, 2020*)

Alternativa 2: Tornillo Sin Fin 8mm De 1 Entrada 2mm de paso con tuerca trapezoidal.

Es una excelente alternativa para transmisiones de movimiento lineal cuando se puede prescindir de la velocidad.

Figura 15

T8 1 hilos pitch 2mm + tuerca



Nota. En el gráfico se muestra un tornillo T8 con 1 hilo. (TORNILLO T8-2D8 400MM 8MM 1 HILO PITCH 2MM + TUERCA – Grupo Electrostore, 2020)

Alternativa 3: Tornillo De Bolas De Diámetro 20mm Paso 5mm

La mejor alternativa si se tiene en cuenta el casi inexistente juego entre las piezas.

Figura 16

Husillo de bolas 20 mm diámetro



Nota. En el gráfico se muestra. (Husillo de bolas diámetro 20mm – Perfiles CNC, 2020)

Los criterios de evaluación para las alternativas presentadas son: precisión, costo, disponibilidad, calidad de transmisión de movimiento.

Cómo se va a utilizar motores a pasos es importante que con el número de pasos del motor se tenga más posiciones delimitadas respecto al eje del carril de enfoque, la característica con mayor importancia es la precisión, la evaluación de los criterios de ponderación se pueden ver en la Tabla 5.

Precisión>Disponibilidad>Calidad de transmisión de movimiento>Costo

Tabla 5

Evaluación de la ponderación de criterios para diseño del tornillo de potencia

Criterio	Precisión	Disponibilidad	Calidad Trans. Mov.	Costo	$\Sigma +1$	Ponderación
Precisión	-	1	0,5	1	3,5	35%
Disponibilidad	0	-	1	1	3	30%
C. Trans. Mov.	0,5	0	-	0,5	2	20%
Costo	0	0	0,5	-	1,5	15%
				Total	10	100%

Nota. En la tabla se muestra la evaluación de la importancia de los criterios de selección.

En la Tabla 6 se realiza una valoración de las alternativas con respecto a los criterios de evaluación, si son 3 alternativas, numerando del 1 al 3 del peor al mejor respectivamente.

Tabla 6

Calificación de las alternativas para diseño tornillo de potencia

Alternativas	Precisión	Disponibilidad	Calidad Trans. Mov.	Costo
8mm 4 entradas + tuerca	1	3	1	3
8mm 1 entradas + tuerca	3	2	2	2
20mm + Husillo de bolas	2	1	3	1
Σ	6	6	6	6

Nota. En la tabla se muestra la evaluación de la importancia de los criterios de selección.

En la Tabla 7 se muestra la valoración de las alternativas de acuerdo con la ponderación.

Tabla 7

Calificación de las alternativas de acuerdo con la ponderación

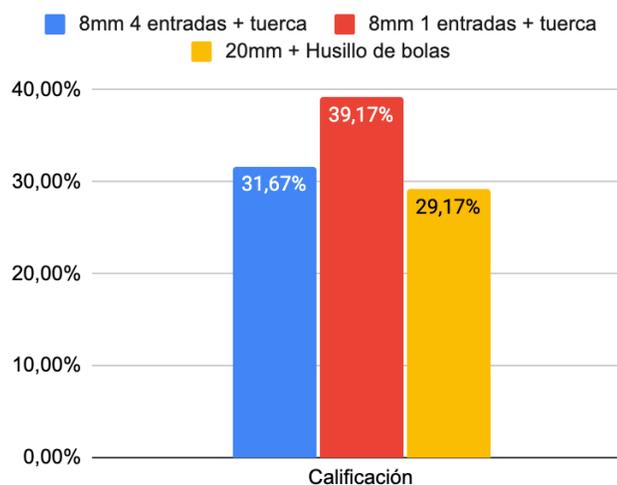
Alternativas	Precisión	Disponibilidad	Calidad Trans. Mov.	Costo	Calificación
8mm 4 entradas + tuerca	5,83%	15,00%	3,33%	7,50%	31,67%
8mm 1 entradas + tuerca	17,50%	10,00%	6,67%	5,00%	39,17%
20mm + Husillo de bolas	11,67%	5,00%	10,00%	2,50%	29,17%

Nota. En la tabla se muestra los porcentajes obtenidos por las alternativas.

La alternativa mejor valorada es la de un tornillo T8 de un hilo, 2 mm de Paso con tuerca, alternativa ganadora con un 39.17% como se puede observar en la Figura 17.

Figura 17

Calificación de las alternativas de selección del tornillo de potencia



Nota. En el gráfico se muestra la alternativa ganadora.

2.2.1.3 Selección de la tarjeta controladora del sistema.

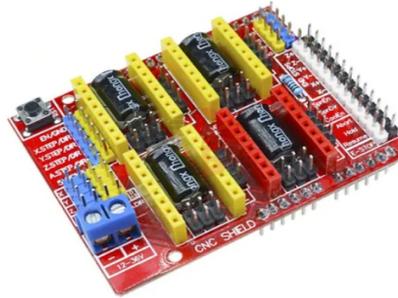
Las alternativas para la tarjeta controladora del sistema toman en cuenta que pueda controlar al menos dos motores, posea algún tipo de comunicación para un HMI, además de tener algunos pines extra para control de entradas y salidas digitales.

Alternativa 1: Arduino 1 + CNC Shield V3

Esta alternativa puede controlar hasta cuatro motores a pasos con sus respectivas finales de carrera, utilizando con ranura para drivers DRV8825 o A4988, con una comunicación serial, para un HMI.

Figura 18

CNC Shield V3 para Arduino 1



Nota. En el gráfico se muestra una CNC Shield para Arduino 1. (Shield Cnc V3 Para Arduino Uno 4 Ejes | Mercado Libre, 2021)

Alternativa 2: Arduino Mega + Ramps 1.4

Con esta alternativa si tiene la posibilidad de control de hasta cinco motores a pasos con la respectiva de Sonora para los Drivers, doble comunicación serial para utilización posterior en un HMI.

Figura 19

Shield Ramps 1.4 para Arduino Mega



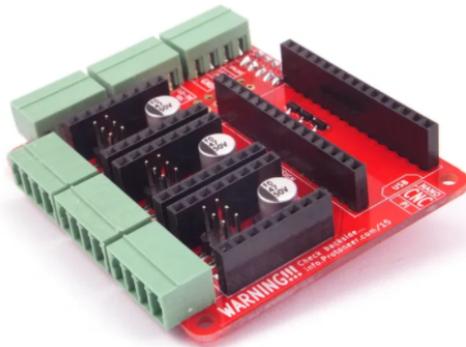
Nota. En el gráfico se muestra una shield Ramps para Arduino Mega. (Shield Ramps 1.4 Controlador Impresora 3d Arduino Mega | Mercado Libre, 2021)

Alternativa 3: Raspberry Pi + CNC Board

Esta alternativa tiene la posibilidad de conexión de hasta cinco motores a paso utilizando los respectivos Drivers, la Raspberry Pi siendo un computador en miniatura ofrece múltiples opciones para la realización de un HMI con conexión de una pantalla.

Figura 20

Raspberry Pi CNC Board



Nota. En el gráfico se muestra una CNC board para Raspberry Pi. (Kuger, 2015)

Los criterios de selección para la elección de la tarjeta controladora son tamaño, costo, facilidad de programación, disponibilidad en el mercado local. La ponderación de estos criterios se puede observar en la Tabla 8, siendo la más importante el tamaño de la tarjeta.

Tamaño > Costo > Facilidad de programación > Disponibilidad

Tabla 8

Evaluación de la ponderación de criterios para selección de la tarjeta de control

Criterio	Tamaño	Costo	Programación	Disponibilidad	Σ +1	Ponderación
Tamaño	-	1	1	1	4	40%
Costo	0	-	0,5	0	1,5	15%
Programación	0	0,5	-	0	1,5	15%
Disponibilidad	0	1	1	-	3	30%
Total					10	100%

Nota. En la tabla se muestra la evaluación de la importancia de los criterios de selección.

En la Tabla 9 se asigna una calificación para cada alternativa del 1 al 3 siendo 1 el peor y 3 el mejor respectivamente.

Tabla 9

Calificación de las alternativas para selección de la tarjeta de control

Alternativas	Tamaño	Costo	Programación	Disponibilidad
Arduino 1 + CNC Shield V3	3	3	2	3
Arduino Mega + Ramps 1.4	1	2	1	2
Raspberry Pi + CNC Board	2	1	3	1
Σ	6	6	6	6

Nota. En la tabla se muestra la evaluación de la importancia de los criterios de selección.

En la Tabla 10 se muestra la valoración de cada una de las alternativas de acuerdo con la ponderación.

Tabla 10

Calificación de las alternativas de acuerdo con la ponderación

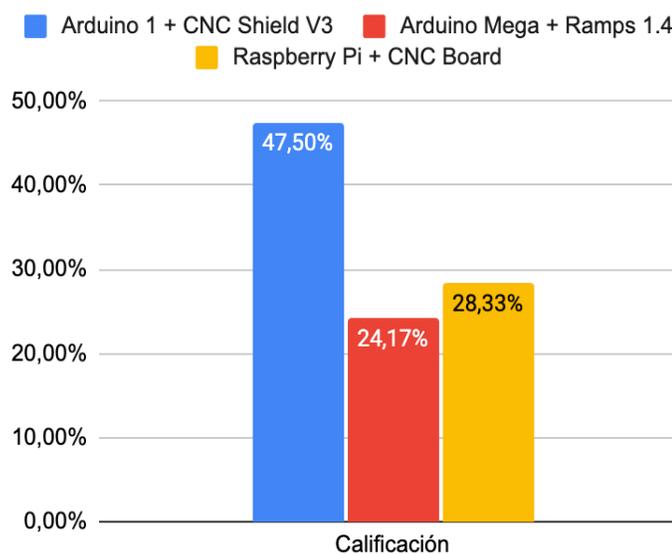
Alternativas	Tamaño	Costo	Programación	Disponibilidad	Calificación
Arduino 1 + CNC Shield V3	20,00%	7,50%	5,00%	15,00%	47,50%
Arduino Mega + Ramps 1.4	6,67%	5,00%	2,50%	10,00%	24,17%
Raspberry Pi + CNC Board	13,33%	2,50%	7,50%	5,00%	28,33%

Nota. En la tabla se muestra los porcentajes obtenidos por las alternativas.

La mejor alternativa es la conformada por el Arduino 1 en conjunto con la CNC Shield V3, ganadora con un porcentaje equivalente a 47,5% como se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Calificación de las alternativas de selección de la tarjeta de control



Nota. En el gráfico se muestra la alternativa ganadora.

2.2.2 Selección de control para el sistema

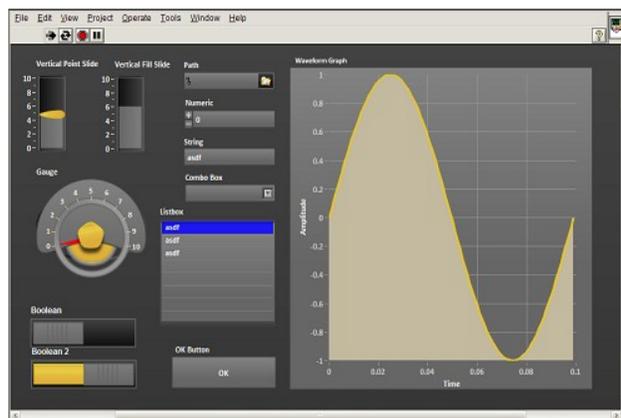
Las consideraciones para el control del sistema son que a partir de la dimensión del objeto de estudio se puedan calcular y controlar los motores y la captura de imágenes.

Alternativa 1: Software LabView

Con esta alternativa se requiere de una conexión a un computador, es visualmente atractivo y fácil de programar.

Figura 22

Ejemplo de HMI utilizando LabView



Nota. En el gráfico se muestra una captura a un VI de LabView. (*Displays and Data Visualization With CompactRIO: The Ultimate Multipurpose Controller - NI, 2021*)

Alternativa 2: Pantalla Nextion

Las pantallas Nextion tienen conexión mediante puerto serial con el Arduino, lo que limita en parte la visualización de los datos y la recepción de los mensajes de los botones, sin embargo, pueden cumplir con las necesidades del sistema.

Figura 23

Pantalla Nextion TFT



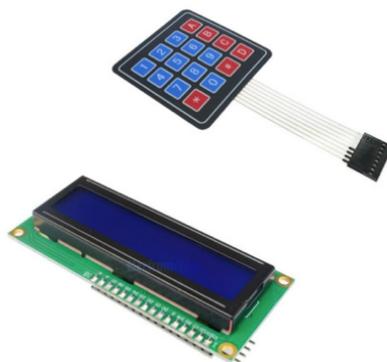
Nota. En el gráfico se muestra pantallas Nextion de varios tamaños. (*Nextion HMI Simulation - Sonsivri, 2021*)

Alternativa 3: Teclado Matricial y Pantalla LCD

El teclado matricial y la pantalla LCD tienen conexión directa con el Arduino y pueden cumplir los objetivos en el sistema automático.

Figura 24

Teclado matricial y Pantalla LCD



Nota. En el gráfico se muestra una pantalla LCD y un teclado. (*Lcd Shield 16x2 Lcd1602 Lcd 1602 Teclado Arduino | Mercado Libre, 2021*)

Los criterios de selección para el control del sistema están basados en la funcionalidad, atractivo y facilidad para el usuario, la ponderación de estos criterios se puede observar en la Tabla 11 estos criterios son: autonomía, tamaño, costo, y usabilidad.

Autonomía del sistema > Tamaño > Usabilidad > Costo

Tabla 11

Evaluación de la ponderación de criterios para selección

Criterio	Autonomía	Tamaño	Usabilidad	Costo	$\Sigma +1$	Ponderación
Autonomía	-	1	1	1	4	40%
Tamaño	0	-	0	1	2	20%
Usabilidad	0	1	-	1	3	30%
Costo	0	0	0	-	1	10%
					Total	100%

Nota. En la tabla se muestra la importancia de los criterios de selección.

En la Tabla 12 se asigna una calificación del 1 al 3 a cada alternativa, siendo 1 lo peor y 3 lo mejor respectivamente.

Tabla 12

Calificación de las alternativas para selección

Alternativas	Autonomía	Tamaño	Usabilidad	Costo
LabView	1	1	3	1
Nextion	3	2	2	2
Pantalla LCD y Teclado	2	3	1	3
Σ	6	6	6	6

Nota. En la tabla se muestra la evaluación de la importancia de los criterios de selección.

En la Tabla 13 se puede observar la calificación de las alternativas de acuerdo con la ponderación establecido.

Tabla 13

Calificación de las alternativas de acuerdo con la ponderación

Alternativas	Autonomía	Tamaño	Usabilidad	Costo	Calificación
LabView	6,67%	3,33%	15,00%	1,67%	26,67%
Nextion	20,00%	6,67%	10,00%	3,33%	40,00%
Pantalla LCD y Teclado	13,33%	10,00%	5,00%	5,00%	33,33%

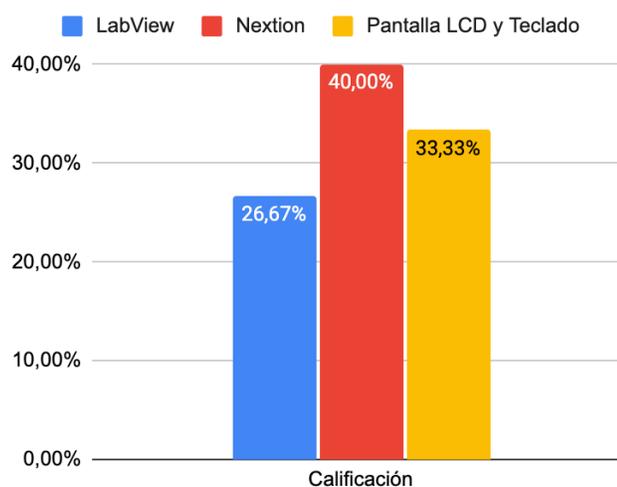
Nota. En la tabla se muestra los porcentajes obtenidos por las alternativas.

La alternativa mejor valorada es la de la pantalla Nextion, con un porcentaje de 40% como se muestra en la Figura 25, se debe tener en cuenta que al utilizar esta

pantalla no se pueden visualizar datos al mismo tiempo que se atiende a los botones por lo tanto se debe realizar una acción si se requiere mostrar algo.

Figura 25

Calificación de las alternativas de selección HMI



Nota. En el gráfico se muestra la alternativa ganadora.

2.2.3 Selección del método de captura automático

Las consideraciones para el método de captura automático de imágenes tienen que ver con el diseño presentado y las consideraciones a tener en cuenta determinadas por el diseñador.

Alternativa 1: Disparo con cable tethering

Esta alternativa puede guardar los archivos directamente en el computador, teniendo en cuenta la dimensión de cada uno de los archivos. Importante si se deseara administrar y configurar los archivos directamente.

Figura 26

Cable Marca Tether Tools



Nota. En el gráfico se muestra un cable para tethering.(Amazon.com: Tether Tools TetherPro - Cable USB 2.0 a Mini-B de 5 pines, 15.1 ft, color naranja de alta visibilidad: Electronics, 2021)

Alternativa 2: Disparo con cable intervalómetro

Con esta alternativa se tiene un cable conectado a la cámara que tiene rutinas semiautomáticas para el disparo de la cámara.

Figura 27

Intervalómetro para disparo de cámara



Nota. En el gráfico se muestra un intervalómetro.(Neewer LCD Mando Intervalometro Disparador Remoto MC-DC2 para Nikon D90 D7100 D4 | eBay, 2018)

Alternativa 3: Circuito de disparo con infrarrojo tipo ML-L3

La idea con esta opción es realizar un circuito disparador con la información de ingeniería inversa que existe de estos dispositivos de Nikon, dando la posibilidad de realizar el disparo directamente desde el microcontrolador.

Figura 28

Infrarrojo ML-L3



Nota. En el gráfico se muestra un ML-L3. (Control remoto inalámbrico ML-L3 (infrarrojo) de Nikon, 2007)

Los criterios que se van a tomar en cuenta para realizar esta selección se basan en la idea de un dispositivo autónomo y de bajo costo como se describe en las necesidades del proyecto. Por lo tanto, los criterios de selección son los siguientes.

Compacto > Autonomía > Usabilidad > Costo

En la Tabla 14 se puede observar la ponderación de cada uno de los criterios para la selección del sistema de captura automático.

Tabla 14

Evaluación de la ponderación de criterios para selección

Criterio	Compacto	Autonomía	Usabilidad	Costo	Σ +1	Ponderación
Compacto	-	0,5	1	0,5	3	30%
Autonomía	0,5	-	1	0	2,5	25%
Usabilidad	0	0	-	1	2	20%
Costo	0,5	1	0	-	2,5	25%
				Total	10	100%

Nota. En la tabla se muestra la evaluación de la importancia de los criterios de selección.

En la Tabla 15 se puede observar la calificación de cada una de las alternativas puntuando del tres al uno siendo tres la mejor opción y uno la peor respectivamente.

Tabla 15

Calificación de las alternativas para selección

Alternativas	Compacto	Autonomía	Usabilidad	Costo
Cable Tethering	1	1	2	1
Interval metro	2	2	1	2
Circuito ML-L3	3	3	3	3
Σ	6	6	6	6

Nota. En la tabla se muestra la evaluación de la importancia de los criterios de selección.

En la Tabla 16 se puede verificar la calificación de las alternativas de acuerdo con la ponderación establecida.

Tabla 16

Calificación de las alternativas de acuerdo con la ponderación

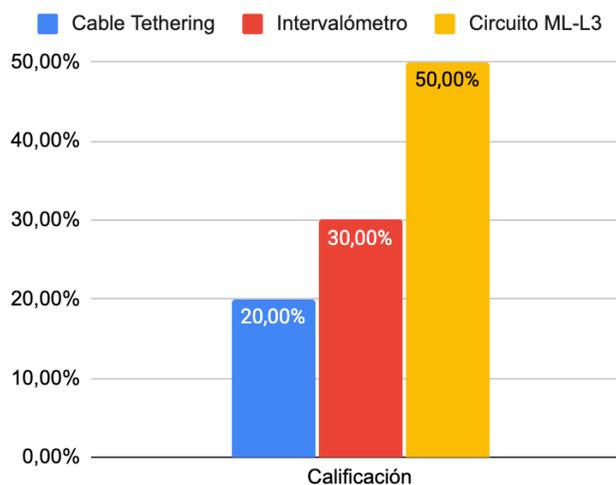
Alternativas	Compacto	Autonomía	Usabilidad	Costo	Calificación
Cable Tethering	5,00%	4,17%	6,67%	4,17%	20,00%
Interval metro	10,00%	8,33%	3,33%	8,33%	30,00%
Circuito ML-L3	15,00%	12,50%	10,00%	12,50%	50,00%

Nota. En la tabla se muestra los porcentajes obtenidos por las alternativas.

La alternativa mejor valorada es el número tres, por lo tanto, se procederá a capturar la información del circuito de un ML-L3 conectándolo al microcontrolador para realizar la captura de imágenes automáticamente aprovechando el receptor infrarrojo de la cámara.

Figura 29

Calificación de las alternativas de selección



Nota. En el gráfico se muestra la alternativa ganadora.

2.2.4 Selección de la apertura efectiva del diafragma

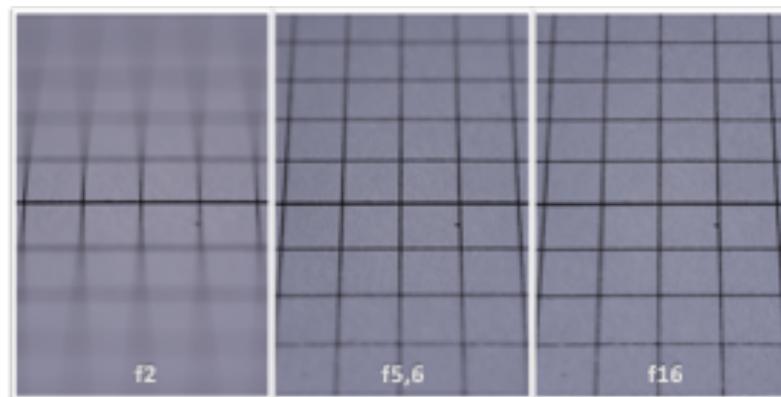
Entre los parámetros importantes a considerar para el dimensionamiento de los elementos y el control de los motores se encuentra la apertura efectiva del diafragma con la que se va a trabajar, para la elección de este valor de diafragma se toma en cuenta la profundidad de campo comparado con la difracción.

Es decir, a un número más alto de diafragma mayor profundidad de campo y mayor difracción, es por esto que se debe elegir un punto intermedio elegido por el diseñador en el cual se tenga una convergencia entre una profundidad de campo no tan limitada y un diafragma no tan cerrado para disminuir la difracción por este motivo.

Se realizó pruebas de profundidad de campo y difracción, como se muestra en la Figura 30 y en la Figura 31, a un diafragma extremadamente abierto, un diafragma medio y un diafragma cerrado al máximo permitido, para explicar estos fenómenos, después se elegirá un punto medio en el que se pueda obtener una profundidad de campo aceptable en la mayor nitidez posible.

Figura 30

Profundidad de campo en diferentes aperturas de diafragma

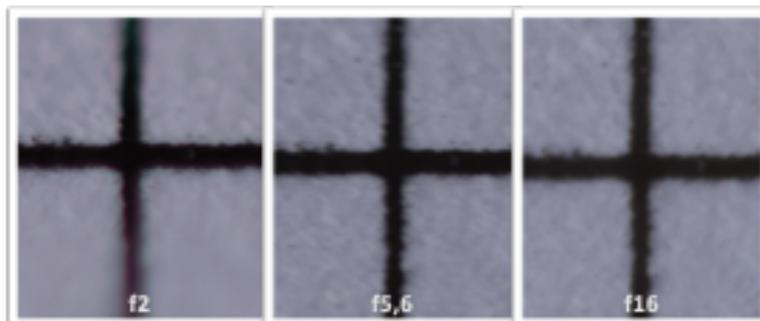


Nota. En el gráfico se muestra imágenes capturadas con diferentes diafragmas.

Se demuestra la difracción presente haciendo zoom a tamaño real de las imágenes, comparando los mismos diafragmas de la imagen anterior.

Figura 31

Difracción en diferentes aperturas de diafragma



Nota. En el gráfico se muestra la difracción en las diferentes imágenes.

La apertura del diafragma establecida tomando en cuenta la difracción y la profundidad de campo obtenidas por el objetivo YN60mm macro es de F5,6.

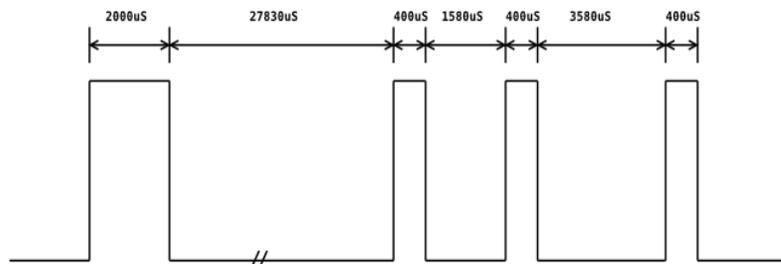
2.3 Diseño del sistema de captura automático

Aprovechando que la cámara DSLR utilizada tiene receptores infrarrojos en la parte frontal y posterior, se diseña un sistema emisor infrarrojo que active el disparo de forma automática.

Partiendo de ingeniería inversa de un disparador infrarrojo para cámaras Nikon comercial se obtiene la trama de pulsos que se debe enviar a la cámara para el disparo, estas tramas se muestran en la Figura 32, se debe notar que mínimas variaciones en los tiempos de activación y desactivación del led IR no influyen en que el circuito no funcione.

Figura 32

Forma de onda led emisor IR

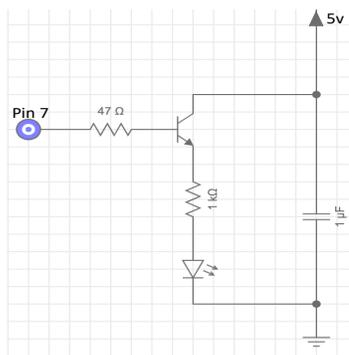


Nota. En el gráfico se muestra la trama de pulsos para realizar el disparo de una cámara Nikon. (Bighiognoli, 2012)

Con los tiempos de trama conocidos, se puede programar al microcontrolador para que con una salida digital controle la activación del led emisor IR, con la ayuda de un circuito amplificador mostrado en la Figura 33 la captura automática funciona perfectamente incluso a varios metros de distancia, por lo que, aunque se utilice la cámara en posiciones no coincidentes con el led, el disparo se ejecuta de manera correcta.

Figura 33

Circuito amplificador utilizado



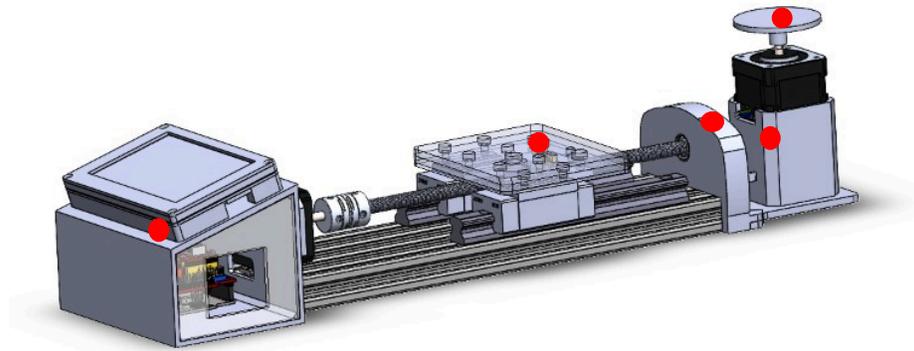
Nota. En el gráfico se muestra el circuito amplificador utilizado.

2.4 Diseño final del sistema automático

En el diseño final se utilizan las partes utilizadas en la selección de componen, además se diseñan piezas indicadas con un punto en la Figura 34, para que con la ayuda de impresión 3d y corte láser, se pueda otorgar funcionalidad sistema, y así solucionar las necesidades planteadas.

Figura 34

Ensamble final



Nota. En el gráfico se muestra el ensamble final con las partes adquiridas y las partes diseñadas.

Capítulo 3

3. Construcción del sistema

En este capítulo se sintetizan procedimientos utilizados para la construcción del sistema de captura de imágenes automático; con base en el diseño presentado y validado se ejecuta la adquisición y fabricación de las piezas de la parte mecánica.

3.1 Construcción del sistema mecánico

Después de haber realizado el diseño se seleccionan los componentes que se los debe construir, en este proyecto se utilizará la impresión en 3D y el corte láser.

3.1.1 Manufactura

La fabricación de algunas de las piezas se realizó mediante impresión 3D para lo cual se utilizó una impresora de la marca Comgrow modelo Ender 3Pro, como se muestra en la Figura 35.

Figura 35

Comgrow Ender 3



Nota. En el gráfico se muestra la impresora Comgrow Ender 3.

Las características de la impresora utilizadas se describen en la Tabla 17.

Tabla 17

Características de la impresora Comgrow Ender 3

Características Impresora Comgrow	
Tecnología de impresión:	FDM (modelado de deposición fundida).
Tamaño de impresión:	220 x 220 x 250mm.
Tamaño de la máquina:	440 x 410 x 465mm.
Peso del paquete:	19 lbs.
Velocidad máxima de viaje:	180mm/s.
Filamento:	1.75 mm PLA.
Entrada:	CA 100-265 V 50-60 Hz.
Salida:	CC 24 V, 15 A, 360 W.
Grosor de la capa:	0.1-0.4mm.
Diámetro de la boquilla:	0.4mm.
Precisión:	±0.1mm.
Formato de archivo:	STL, OBJ y G-Code.
Modo de trabajo:	en línea o SD fuera de línea.
Temperatura máxima de la boquilla:	491°F.
Temperatura máxima de la cama caliente:	230°F.
Reanudar la impresión después de apagado:	Sí.

Nota. En la tabla se muestra las características de la impresora a utilizar. (*Amazon.com: ComgrowCrealty Ender 3, 2021*)

3.1.1.1 Preparación del archivo digital.

Después de realizar el diseño CAD si requiere importar el modelo 3D de la pieza en formato SPL, este es un formato que la impresora 3D que se va a utilizar reconoce, es importante definir la posición y orientación de la pieza. El software de la impresora

3D genera código G que describe las rutas que va a seguir la impresora, este código se debe guardar en un archivo .G en una tarjeta microSD.

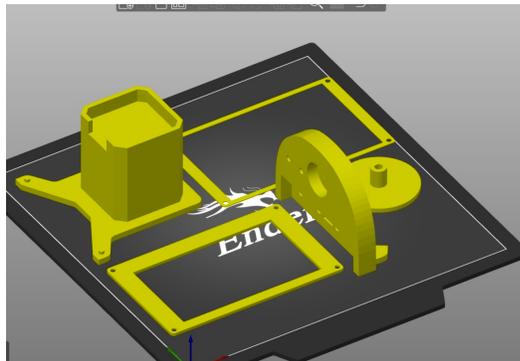
3.1.1.2 Configuración de los parámetros de impresión.

Los parámetros de impresión se definen de acuerdo a cada una de las piezas, dependiendo de la geometría de la pieza se modifican los siguientes parámetros: material de soporte, altura de la capa, porcentaje de relleno, velocidad de impresión, y temperatura de la cama y del extractor. Recalcando que es muy importante la orientación de la pieza al momento de imprimir.

En la Figura 36 se muestra la posición de algunas de las piezas del diseño.

Figura 36

Archivos STL a imprimir



Nota. En el gráfico se muestra la posición de las piezas diseñadas.

3.1.1.3 Retiro del material de soporte.

En alguna de las piezas que tengan una geometría difícil de construir como por ejemplo la caja donde se encuentra la pantalla Nextion, se tiene que añadir material de soporte, éste se debe retirar de forma manual una vez finalizada la impresión, el software utilizado permite configurar la adición de material de soporte de manera que para retirar no exista mayor dificultad. Para este proceso es necesario disponer de algunas herramientas con la finalidad de conseguir un buen acabado.

3.1.2 Ensamble de piezas

En el diseño presentado si tiene una base de perfil de aluminio $20 \times 20 \times 80$ en donde mediante tornillería prevista en el diseño se ajustan todas las piezas, las de impresión y las de corte, en la Figura 37 se muestra el ensamble terminado.

Figura 37

Ensamblado parte mecánica



Nota. En el gráfico se muestra el ensamble de la parte mecánica.

3.3 Implementación del sistema electrónico y de control

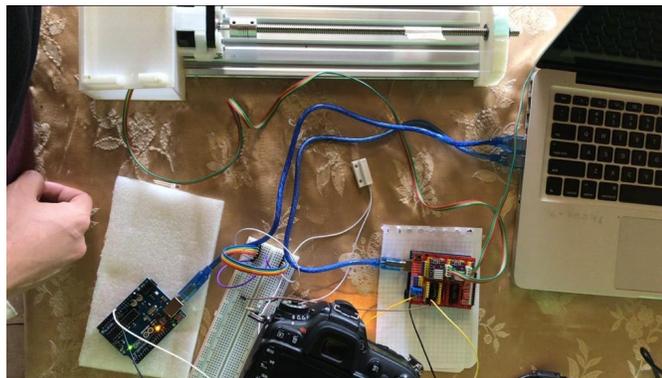
En esta sección se muestra la elaboración y el ensamble del sistema electrónico y de control mediante HMI con pantalla Nextion TFT utilizando un método automático de captura de imágenes.

3.3.1 Ensamble del sistema electrónico

Utilizando la CNC shield con los drivers para el control de los motores a pasos, el circuito disparador conectado, se define que un sensor de tipo magnético sería la mejor opción el final de carrera del carril de enfoque; la iluminación se resuelve con un relé activador para los leds y todo conectado con la pantalla Nextion en los pines correspondientes a la comunicación serial para la interacción con Arduino, una prueba de funcionamiento del montaje de la parte electrónica se muestra en la Figura 38.

Figura 38

Montaje de prueba del sistema electrónico



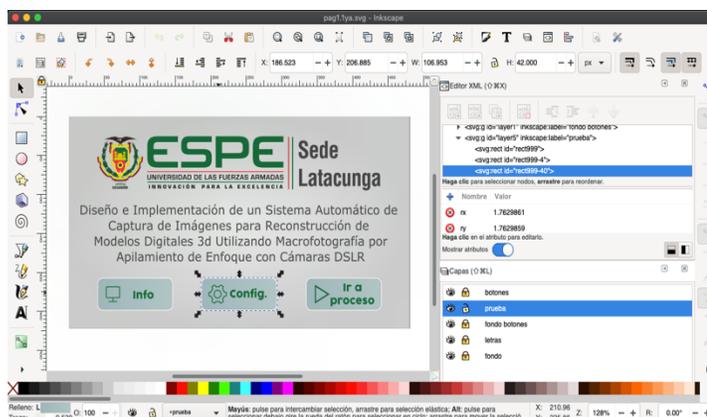
Nota. En el gráfico se muestra una prueba de los elementos electrónicos y sistema de captura.

3.4 Diseño del control mediante HMI

En sala de control industrial es necesario tener en cuenta el diseño centrado en el usuario. Ello comporta la incorporación de disciplinas como la ergonomía, el diseño de interfaz persona-máquina, y la ingeniería de sistemas. La ergonomía cognitiva aporta estudios respecto al procesamiento de la información, la carga mental de la tarea, y la ejecución de acciones atendiendo a la presencia de error humano. (Ponsa et al., 2006)

Figura 39

Diseño gráfico de la Interfaz HMI



Nota. En el gráfico se muestra el diseño del HMI.

Para el HMI partiendo de la selección de la pantalla Nextion, se realizó el diseño de las páginas en Inkscape como se muestra en la Figura 39, utilizando como referencia los indicadores de la Guía Ergonómica para el Diseño de la Interfaz de supervisión que se muestran en la Figura 40.

Figura 40

Indicadores de la Guía GEDIS

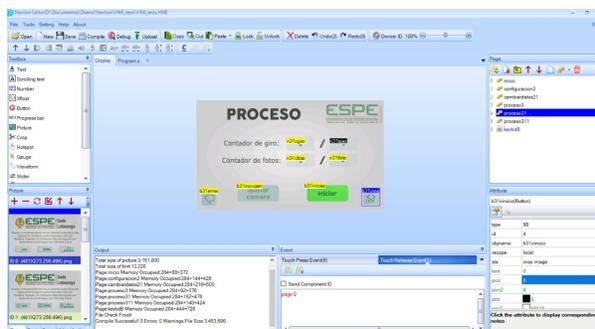
Indicador	Definición	Entradas	Salidas
Arquitectura	Organización jerárquica de las pantallas	De la planta física a la monitorización gráfica	Mapa de relaciones entre pantallas y sus funciones
Distribución de pantallas	Plantillas de los diferentes tipos de pantalla	Diseño de los procesos físicos y subprocesos	Clasificación de tipos de pantallas y tipos de plantillas
Navegación	Modos de navegación entre pantallas	Controles de navegación entre subprocesos	Navegación equilibrada en anchura y profundidad
Uso del color	Asociación de funcionalidades en el ámbito del control de procesos	Requisitos sobre dispositivos de información visual	Uso del color adecuado en el contexto
Uso de fuentes e información textual	Abanico de fuentes y asociación de funcionalidades	Fuentes y tamaños legibles por el operario	Estándares de fuentes, acrónimos y abreviaturas
Estatus de los equipos y eventos de proceso	Símbolos e iconos gráficos para representar el estado de la planta y los cambios de estado	Estándares nacionales y/o internacionales en control supervisor	Uso de símbolos e iconos reconocibles por el operario experto
Información y valores de proceso	Presentación de los datos analógicos/digitales en los gráficos	Procesamiento de la información	Lista clasificada de las variables del proceso
Gráficos de tendencias y tablas	Presentación y agrupación de valores en gráficos de tendencias (históricos) y tablas	Procesamiento de la información	Lista de agrupaciones de datos en gráficos y tablas en los sinópticos de proceso
Comandos y entradas de datos	Modo de entrada de datos a la interfaz	Estándares de diseño de comandos y entrada de datos	Accesibilidad a la manipulación de parámetros y consignas
Alarmas	Características principales del subsistema de alarmas	Estimación del riesgo	Listado de alarmas, clasificación por prioridades

Nota. En el gráfico se muestra los indicadores de la guía GEDIS.

La pantalla Nextion cuenta con un procesador integrado y una pantalla táctil, el software Nextion Editor crea la configuración e identificación de los elementos del HMI, para su posterior programación en el microcontrolador utilizado, se puede observar una muestra de la identificación de los componentes de la pantalla en la Figura 41.

Figura 41

Identificación de elementos a enviar al MCU



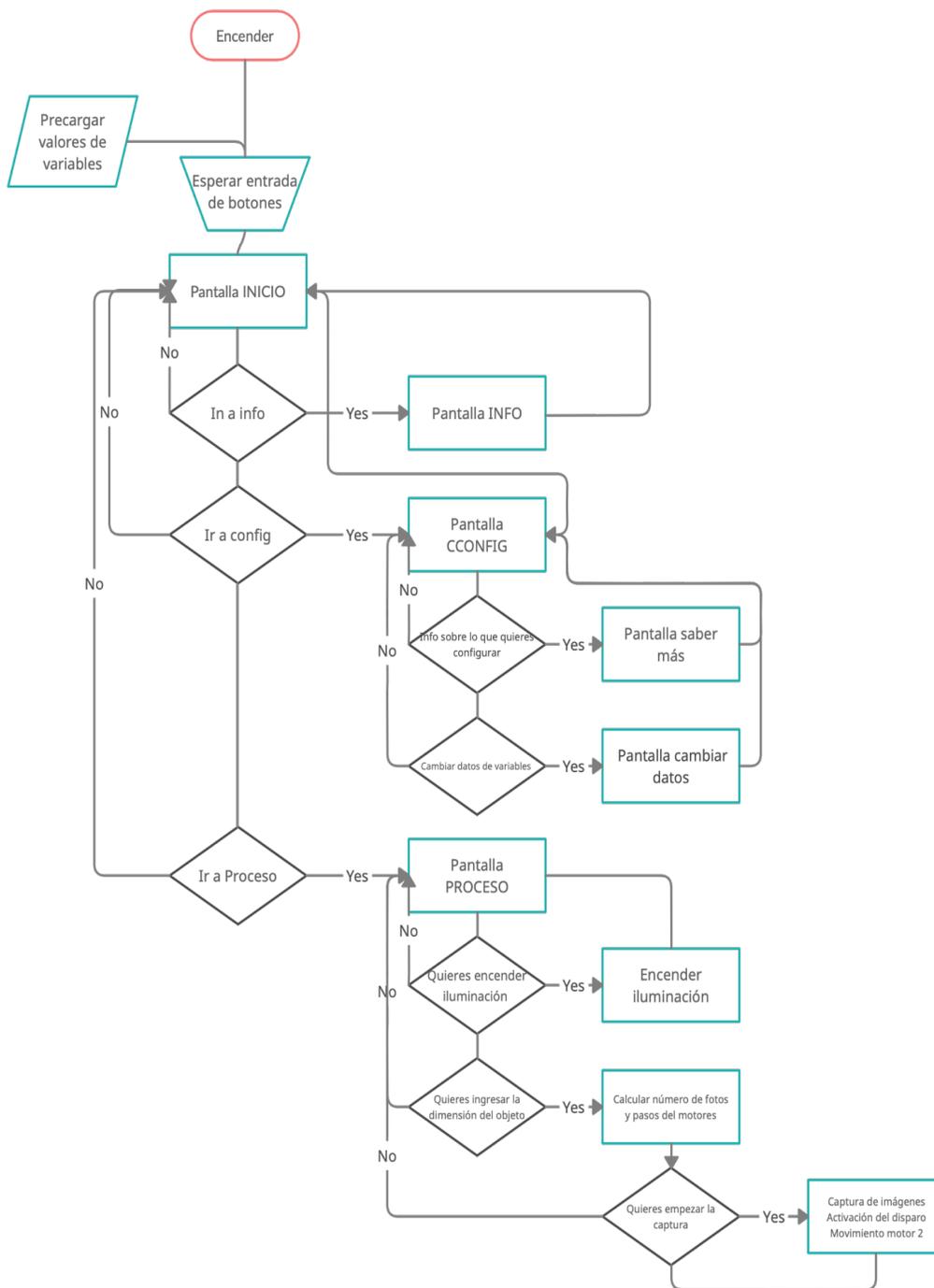
Nota. En el gráfico se muestra la programación de los elementos en Nextion Editor.

3.4.1 Descripción de la programación

Para la programación se realizó la mayor parte en Arduino y algunas opciones en el editor de la pantalla, lo que va a estar pasando en todo momento es que el microcontrolador espera constantemente alguna entrada de la pantalla, si el usuario ingresa al botón de información se desplegará una descripción del proceso que se puede realizar, si el usuario ingresa al botón de configuración le dará información sobre las variables que puede modificar y le dará la opción de modificarlas, y si el usuario ingresa al botón de proceso ingresará a una pantalla donde le permite activar la iluminación del sistema, ingresar la dimensión del objeto y también ingresar el número de pasos del motor dos que realiza el movimiento giratorio del objeto para realizar el solapamiento, con los datos ingresados el microcontrolador realiza los cálculos del número de fotos a tomarse en cada apilado y el número de pasos que debe de recorrer el motor uno, el diagrama de flujo de la programación del microcontrolador se muestra representada en la Figura 42.

Figura 42

Diagrama de flujo de la programación del MCU



Nota. En el gráfico se muestra el diagrama de flujo de la programación utilizada en el microcontrolador.

3.4.2 Cálculos del recorrido de los motores

Para calcular el recorrido de los motores se necesita calcular la profundidad de campo y ese valor transformarlo a pasos del motor, para el cálculo de la profundidad de campo se utiliza la Ecuación 1.

$$Pdc = 2 \cdot c \cdot f \cdot \frac{m + m}{m \cdot m}$$

Ecuación 1

Fórmula para el cálculo de la Profundidad de Campo

En donde:

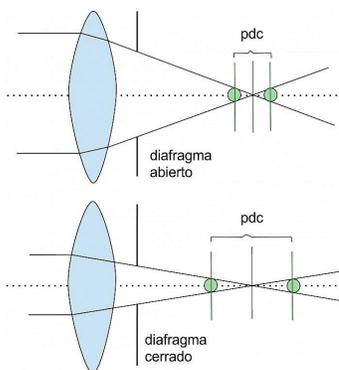
f = la apertura efectiva del diafragma

m = el factor de magnificación del lente utilizado

c = el círculo de confusión explicado en la Figura 43.

Figura 43

Explicación de la profundidad de Campo y el Círculo de Confusión



Nota. En el gráfico se muestra una explicación del círculo de confusión. (*El Círculo de Confusión: Qué Es y Cómo Influye en tus Fotos*, 2016)

Se denomina círculo de confusión a la imagen que se obtiene de un punto de la escena, sobre el sensor o plano focal, cuyo diámetro varía en función de que el punto esté más o menos enfocado. La determinación del diámetro del círculo de confusión aceptable consiste en encontrar el tamaño del círculo de confusión óptimo para que un punto se perciba como enfocado, lo que depende del tamaño del sensor, las dimensiones de la copia impresa y la distancia de observación de la copia. (Cabezos Bernal & Cisneros Vivó, 2012)

$$c = \frac{d_o \cdot d_s}{d \cdot 1760}$$

Ecuación 2

Fórmula para el cálculo del círculo de confusión

En la Ecuación 2 se muestra la fórmula para calcular el círculo de confusión, siendo

c = círculo de confusión

d_o distancia de observación

d_s diagonal del sensor

d diagonal de la copia

Como se conoce la diagonal del sensor de la cámara Nikon d7200 la fórmula queda de la siguiente manera mostrada en la Ecuación 3.

$$c = \frac{d_o}{d \cdot 60}$$

Ecuación 3

Fórmula para el cálculo del círculo de confusión para cámara Nikon APS-C

Las medidas reales de una imagen de la cámara Nikon d7200 son 63.5cm x 42.33cm como se muestra en la Figura 44.

Figura 44

Dimensiones reales imagen Nikon d7200



Nota. En el gráfico se muestra las medidas de una imagen de la cámara Nikon d7200.

Calculando la diagonal de la imagen a tamaño real, utilizando una medida fija de distancia de observación equivalente a 60 cm, y sustituyendo estos valores en la Ecuación 2 se obtiene un valor del círculo de confusión equivalente a 0.02mm.

Ya con todos los datos conocidos de la Ecuación 1 se procede a sustituir los datos y obtener el valor de la profundidad de campo en mm igual a 0.448mm, este es el valor que se tiene que transformar a pasos del motor utilizando las características del tornillo de potencia seleccionado.

El dato más relevante del tornillo de potencia es el paso que en el caso del tornillo seleccionado es de 2mm, lo que significa que por cada vuelta del motor el avance horizontal será del valor del paso.

En el caso de los motores a pasos del sistema dan 200 pasos en cada vuelta, es decir que da 100 pasos por cada milímetro de desplazamiento, para el recorrido de la profundidad de campo se tiene que se deben dar 45 pasos.

Cuando se está realizando apilamiento de enfoque se requiere un solapamiento entre las imágenes, este solapamiento se considera seguro cuando se realiza con un aproximado del 25%, por cuanto los pasos a dar entre toma y toma serán el 75% de 45 pasos, esto es igual a 34 pasos. Los motores a pasos se están ocupando en la configuración de pasos completos, pero por la utilización del solapamiento de seguridad no es necesario preocuparse de la pérdida de menos de un paso en cada movimiento, sin embargo, se lo compensa por software.

3.5 Análisis de costos del sistema

En la Tabla 18 se muestran los costos de todos los elementos necesarios para implementar el sistema de captura automático.

Tabla 18

Costos de materiales y software

CANTIDAD	ELEMENTO	VALOR UNITARIO \$	VALOR TOTAL \$
1	Cámara NIKON d7200	1000	1000
1	Objetivo YN 60mm f2 1:1	379	379
1	Tarjeta SD 4gb kingston	29	29
1	Tarjeta SD 32gb kingston clase V	8	8
1	Zpod para soporte de Cámara	59	59
1	Zapata arca swiss para sujeción rápida	10	10
1	Pantalla Nextion TFT NX4827T043	69,75	69,75
2	Riel HG15CA x 20cm	11,16	22,32

CANTIDAD	ELEMENTO	VALOR UNITARIO \$	VALOR TOTAL \$
2	Bloque HG15CA	25,89	51,78
1	Perfil aluminio V 2080x30cm	7,84	7,84
1	Rodamiento 688	0,89	0,89
1	T8 1 hilo 2mm pitch	16	16
2	Collar de seguridad	0,71	1,42
8	Perno M5x20	0,09	0,72
10	Perno M4x16	0,09	0,9
8	Perno M4x12	0,09	0,72
10	Tuerca T serie 20 M4	0,09	0,9
1	Portamachuelo	12	12
1	Kit machuelos M5	6	6
1	Arduino 1	12	12
2	DRV 8825	4	8
1	Sensor interruptor magnético	3,5	3,5
1	CNC shield v3	8	8
2	Motor a pasos Nema 17 0.4A 12V	16	32
1	Led IR	0,3	0,3
1	Transistor NPN 3904	0,05	0,05
2	Condensador 47uF	0,1	0,2
3	Resistencia 220ohm	0,05	0,15
3	LED 12V	7	21
1	Transformador AC/DC 5A	12	12
1	Cuello de ganso	21	21
1	Ventilador	2	2
1	Módulo Relay	6	6
1	Botón 2 posiciones	2	2
1	Licencia limitada Reality Capture	10	10
1	Licencia software CombineZP	0	0
30	Hora impresión 3d	1,25	37,5
15	Minuto corte láser varios grosores	1	15
		TOTAL	1866,94

Nota. En la tabla se muestra los costos de materiales y softwares utilizados en el sistema.

Capítulo 4

4. Pruebas y análisis de resultados

Una vez realizado el ensamblaje de los elementos mecánicos y electrónicos, se procede a la realización de pruebas, primero en vacío para verificar el correcto funcionamiento del sistema.

Las primeras pruebas se realiza la verificación de la activación del sistema mediante el HMI, debido a que esta es una pantalla resistiva y la costumbre a las actuales pantallas capacitivas hace que las primeras veces la activación del sistema no se pueda realizar, hasta que se practica la interacción con la pantalla y la activación es satisfactoria en todas las ocasiones.

Para las pruebas se realizó tres ensayos:

- Captura de 12 fotografías 6 veces
- Captura de 20 fotografías 16 veces
- Captura de 36 fotografías 20 veces

Con estos ensayos se realizará tres pruebas, pruebas de captura, pruebas de apilado y pruebas de reconstrucción.

4.1 Prueba de captura de imágenes

La prueba consta analiza las veces que hizo el número de captura de imágenes correctas según el número de imágenes requerido en el ensayo.

4.1.1 Prueba de captura 1

En la Tabla 19 se puede evidenciar que la captura se realizó correctamente en 5 de las 6 ocasiones, en la captura # 4 falló registrando una captura menos de las requeridas.

Tabla 19

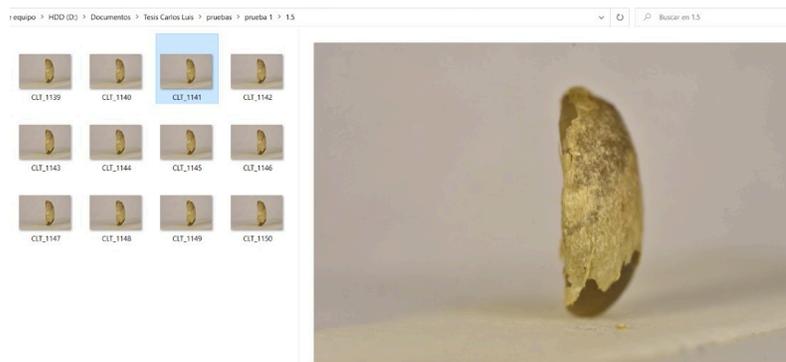
Prueba de captura 1

#Captura	#Fotos	
	SI	NO
1	x	
2	x	
3	x	
4		x
5	x	
6	x	

Nota. En la tabla se muestra si se realizó 12 fotos en cada uno de los apilados del ensayo 1.

Figura 45

Prueba de captura 1



Nota. En el gráfico se muestra una imagen capturada en la primera prueba.

4.1.2 Prueba de captura 2

Como se muestra en la Tabla 20 se puede evidenciar que en la prueba número dos el número de aciertos en la cantidad de capturas fue de 13 y el número de errores fue 3.

Tabla 20

Prueba de captura 2

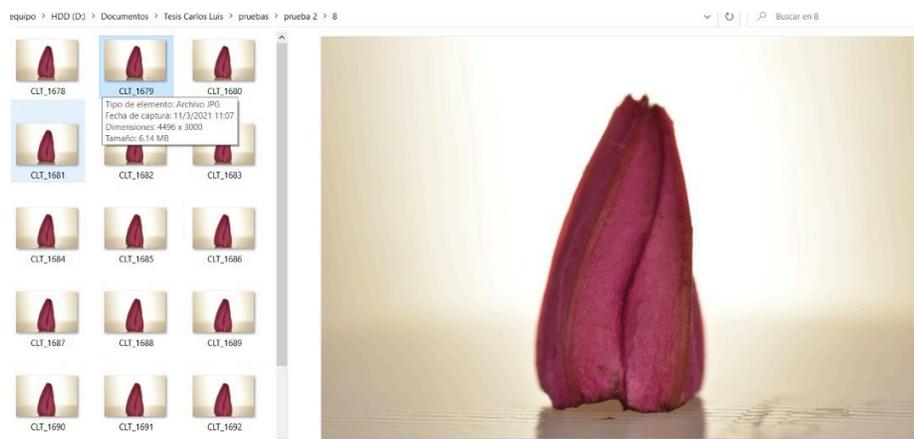
#Captura	#Fotos	
	SI	NO
1	X	
2	X	
3		X
4	X	
5	X	
6	X	
7	X	
8	X	
9	X	
10	X	
11		X
12	X	

#Captura	#Fotos	
	SI	NO
13	x	
14		x
15	x	
16	x	

Nota. En la tabla se muestra si se realizó 20 fotos en cada uno de los apilados del ensayo 2.

Figura 46

Prueba de captura 2



Nota. En el gráfico se muestra una imagen capturada por la cámara Nikon d7200 en la segunda prueba.

4.1.3 Prueba de captura 3

Como se muestra en la Tabla 21 se puede evidenciar que en la prueba número tres el número de aciertos en la cantidad de capturas fue de 21 y se obtuvo un error.

Tabla 21

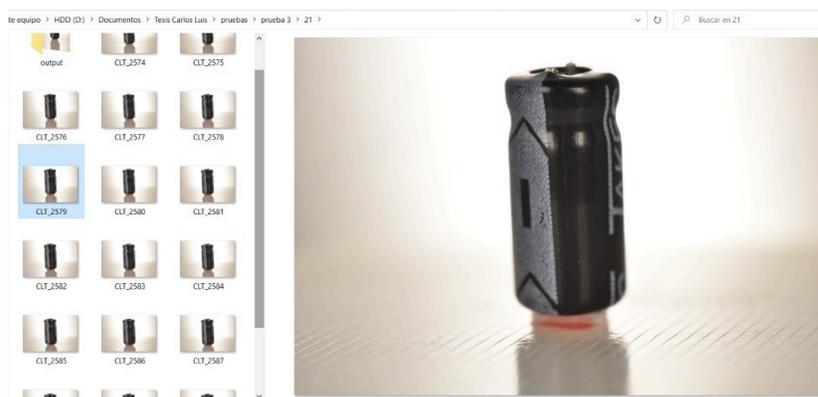
Prueba de captura 3

#Captura	#Fotos		#Captura	#Fotos	
	SI	NO		SI	NO
1	x		11	x	
2		x	12	x	
3	x		13	x	
4	x		14	x	
5	x		15	x	
6	x		16	x	
7	x		17	x	
8	x		18	x	
9	x		19	x	
10	x		20	x	

Nota. En la tabla se muestra si se realizó 36 fotos en cada uno de los apilados del ensayo 3.

Figura 47

Prueba de captura 3



Nota. En el gráfico se muestra una imagen capturada por la cámara Nikon d7200 en la primera prueba.

4.2 Prueba de apilamiento de imágenes

En la prueba de apilado se utiliza las imágenes de la prueba anterior para analizar si con ellas se puede realizar el apilamiento de enfoque y obtener una imagen completamente enfocada.

4.2.1 Prueba de apilado 1

En la prueba de apilado número 1 se puede evidenciar mediante la Tabla 22 que en cada una de los apilados se realizó correctamente.

Tabla 22

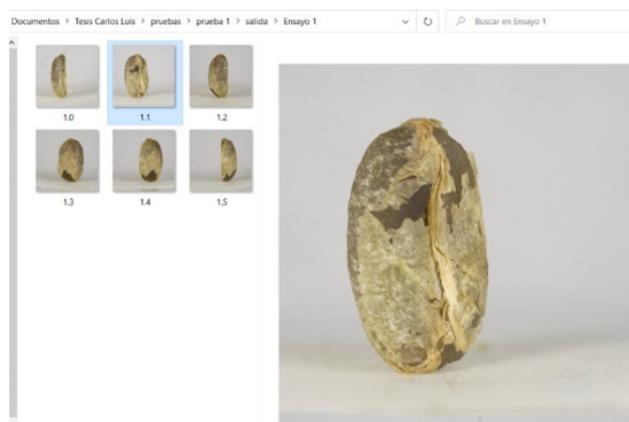
Prueba de apilado 1

#Captura	Apilado	
	SI	NO
1	x	
2	x	
3	x	
4	x	
5	x	
6	x	

Nota. En la tabla se muestra si se realizó el apilado en todas las ocasiones en el ensayo 1.

Figura 48

Prueba de apilado 1



Nota. En el gráfico se muestra las imágenes apiladas de la primera prueba.

4.2.2 Prueba de apilado 2

En la prueba de apilado número 2 se puede evidenciar mediante la Tabla 23 que en cada una de los apilados se realizó correctamente.

Tabla 23

Prueba de apilado 2

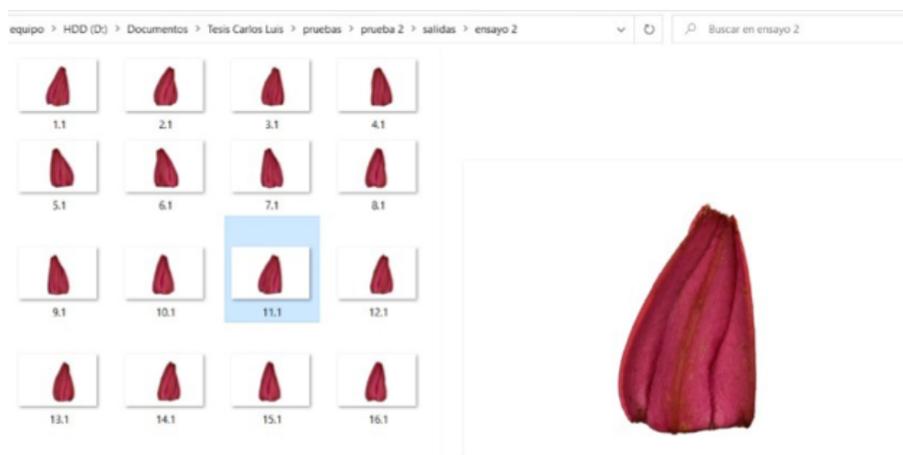
#Captura	Apilado	
	SI	NO
1	x	
2	x	
3	x	
4	x	
5	x	
6	x	
7	x	
8	x	
9	x	
10	x	
11	x	

12	x
13	x
14	x
15	x
16	x

Nota. En la tabla se muestra si se realizó el apilado en todas las ocasiones en el ensayo 2.

Figura 49

Prueba de apilado 2



Nota. En el gráfico se muestra las imágenes apiladas de la segunda prueba.

4.2.3 Prueba de apilado 3

En la prueba de apilado número 3 se puede evidenciar mediante la Tabla 24 que en cada una de los apilados se realizó correctamente.

Tabla 24*Prueba de apilado 3*

#Captura	Apilado		#Captura	Apilado	
	SI	NO		SI	NO
1	x		11	x	
2	x		12	x	
3	x		13	x	
4	x		14	x	
5	x		15	x	
6	x		16	x	
7	x		17	x	
8	x		18	x	
9	x		19	x	
10	x		20	x	

Nota. En la tabla se muestra si se realizó el apilado en todas las ocasiones en el ensayo 3.

Figura 50*Prueba de apilado 3*

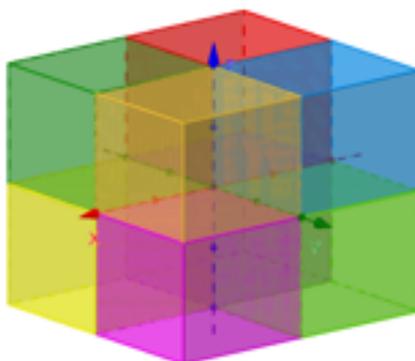
Nota. En el gráfico se muestra las imágenes apiladas de la tercera prueba.

4.3 Prueba de reconstrucción 3D

En esta prueba se analiza si el número de imágenes obtenidas en el proceso de apilado es suficiente información como para generar el modelo digital del objeto estudiado, para evitar solo decir sí o no se reconstruyó se va a analizar el modelo en octantes como se muestra en la Figura 51, analizando si tiene una reconstrucción exitosa en cada uno de ellos.

Figura 51

Octantes



Nota. En el gráfico se muestra la localización de los octantes en un espacio 3d.

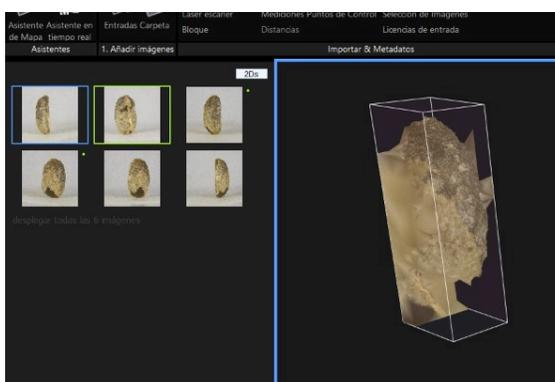
4.3.1 Prueba de reconstrucción 3d 1

Con una base de 6 imágenes del primer ensayo se realizó la reconstrucción del objeto en solo dos octantes como se puede evidenciar en la Tabla 25, evidenciando que el modelo generado no era fiel al modelo ingresado.

Tabla 25*Prueba de reconstrucción 3d 1*

#	Recons. 3D	
	SI	NO
1	x	
2		x
3		x
4		x
5	x	
6		x
7		x
8		x

Nota. En la tabla se muestra si se realizó la reconstrucción en cada uno de los octantes del objeto 1.

Figura 52*Prueba de reconstrucción 3d 1*

Nota. En el gráfico se muestra la reconstrucción realizada del primer objeto con 6 imágenes.

4.3.2 Prueba de reconstrucción 3d 2

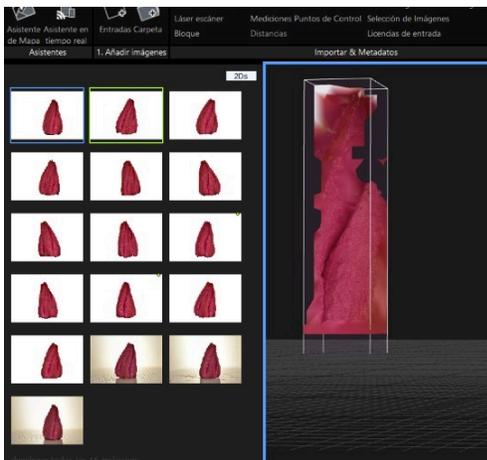
Con una base de 16 imágenes del primer ensayo se realizó la reconstrucción del objeto en solo tres octantes como se puede evidenciar en la Tabla 26, evidenciando que el modelo generado no era fiel al modelo ingresado a pesar de que capturaba parcialmente su forma y mostraba la textura y color del objeto.

Tabla 26

Prueba de reconstrucción 3d 2

#	Recons. 3D	
	SI	NO
1		x
2		x
3		x
4		x
5	x	
6		x
7	x	
8	x	

Nota. En la tabla se muestra si se realizó la reconstrucción en cada uno de los octantes del objeto 2.

Figura 53*Prueba de reconstrucción 3d 2*

Nota. En el gráfico se muestra la reconstrucción realizada del segundo objeto con 16 imágenes.

4.3.3 Prueba de reconstrucción 3d 3

Con la base de 36 imágenes del tercer modelo se puede evidenciar que, si se realizó la reconstrucción tridimensional en todos los octantes como se muestra en la Tabla 27, evidenciando una calidad alta y un objeto fiel al modelo ingresado, como se muestra en la Figura 54.

Tabla 27*Prueba de reconstrucción 3d 3*

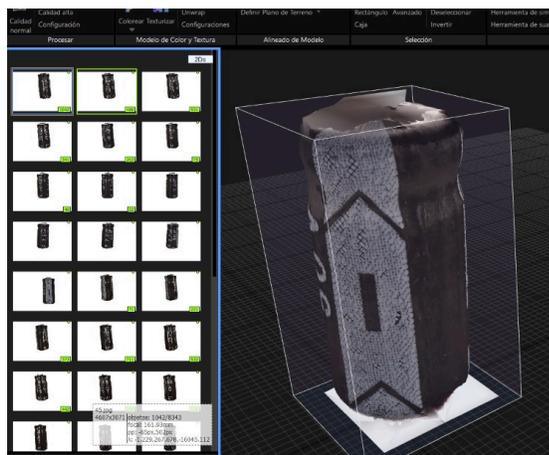
#	Recons. 3D	
	SI	NO
1	X	
2	X	
3	X	

#	Recons. 3D	
	SI	NO
4	X	
5	X	
6	X	
7	X	
8	X	

Nota. En la tabla se muestra si se realizó la reconstrucción en cada uno de los octantes del objeto 3.

Figura 54

Prueba de reconstrucción 3d 3



Nota. En el gráfico se muestra la reconstrucción realizada del tercer objeto con 36 imágenes.

4.4 Evaluación del sistema de reconstrucción 3D

Con el sistema de captura automático, con las pruebas presentadas en el capítulo anterior se verifica que con las imágenes capturadas después de haber

aplicado la técnica de apilamiento de enfoque, se realiza reconstrucción de modelos digitales 3d, esto siempre ligado al número de imágenes que ingresen al software de reconstrucción, después de las pruebas se verifica que siempre después de una entrada de 20 imágenes se obtiene un modelo digital relacionado con el objeto de entrada, con menos imágenes de entrada no se puede obtener la reconstrucción del modelo a pesar de obtener información parcial de su forma y de su textura.

Para la validación de la hipótesis se han realizado varias pruebas ingresando cada vez un valor diferente de imágenes en el software para ver si se realizaba la reconstrucción del objeto ingresado, cabe recalcar que cuando se realizaba una reconstrucción parcial se tomaba en cuenta como una prueba no valida.

4.5 Validación de hipótesis

La hipótesis planteada es:

¿El diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes permitirá reconstrucción de modelos digitales 3d utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR?

4.5.1 Variable independiente:

Sistema automático de captura de imágenes.

4.5.2 Variable dependiente:

Reconstrucción de modelos digitales 3D utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR.

Para realizar la validación de la hipótesis del proyecto de investigación la aplicación del método estadístico de Pearson mejor conocido como Ji-cuadrado, que consiste en comparar la frecuencia observada de los datos con la frecuencia esperada.

Para la utilización de este método es necesario definir una hipótesis nula y una hipótesis alternativa, presentadas a continuación:

Ho: El diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes no permitirá reconstrucción de modelos digitales 3d utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR.

Hi: El diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes permitirá reconstrucción de modelos digitales 3d utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR.

Tabla 28

Datos obtenidos de las pruebas

# Fotos para reconstrucción	Reconstruye	No reconstruye	Total pruebas
4	0	2	2
10	1	2	3
16	3	1	4
20	5	0	5
32	5	0	5
	14	5	19

Nota. En la tabla se muestra las pruebas de reconstrucción de acuerdo al numero de fotos ingresadas.

Para verificar el estado de la hipótesis se desarrollan los siguientes cálculos mostrados en la Ecuación 4.

$$\lambda^2_{calc} = \sum \frac{(f_{real} - f_{teórica})^2}{f_{teórica}}$$

Ecuación 4

Fórmula para el cálculo del Ji-cuadrado

Cálculo de frecuencias teóricas por cada uno de los valores de la Tabla 27.

$$0R \rightarrow \frac{14 * 2}{19} = 1,47$$

$$2NR \rightarrow \frac{5 * 2}{19} = 0,52$$

$$1R \rightarrow \frac{14 * 3}{19} = 2,21$$

$$2NR \rightarrow \frac{5 * 3}{19} = 0,78$$

$$3R \rightarrow \frac{14 * 4}{19} = 2,94$$

$$1NR \rightarrow \frac{5 * 4}{19} = 1,05$$

$$5R \rightarrow \frac{14 * 5}{19} = 3,68$$

$$0NR \rightarrow \frac{5 * 5}{19} = 1,31$$

$$5R \rightarrow \frac{14 * 5}{19} = 3,68$$

$$0NR \rightarrow \frac{5 * 5}{19} = 1,31$$

Cálculo de λ^2_{calc}

$$\lambda^2_{calc} = \frac{(0 - 1,47)^2}{1,47} + \frac{(1 - 2,21)^2}{2,21} + \frac{(3 - 2,94)^2}{2,94} + \frac{(5 - 3,68)^2}{3,68} + \frac{(5 - 3,68)^2}{3,68} + \frac{(2 - 0,52)^2}{0,52} \\ + \frac{(2 - 0,78)^2}{0,78} + \frac{(1 - 1,05)^2}{1,05} + \frac{(0 - 1,31)^2}{1,31} + \frac{(0 - 1,31)^2}{1,31}$$

$$\lambda^2_{calc} = 11,69$$

Se requiere saber el valor de la tabla, previo a esto se necesita calcular los grados de libertad.

$$n = (f - 1)(c - 1)$$

$$n = (5 - 1)(2 - 1)$$

$$n = 4$$

Con el valor de los grados de libertad y para un nivel de confiabilidad de 95%, se obtiene el valor de la tabla para valores críticos de Ji-cuadrado, este valor de la tabla corresponde a:

$$\lambda^2_{tabla} = 9,49$$

Figura 55

Distribución de λ^2

DISTRIBUCION DE χ^2

Grados de libertad	Probabilidad											
	0,95	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,01	0,001	
1	0,004	0,02	0,06	0,15	0,46	1,07	1,64	2,71	3,84	6,64	10,83	
2	0,10	0,21	0,45	0,71	1,39	2,41	3,22	4,60	5,99	9,21	13,82	
3	0,35	0,58	1,01	1,42	2,37	3,66	4,64	6,25	7,82	11,34	16,27	
4	0,71	1,06	1,65	2,20	3,36	4,88	5,99	7,78	9,49	13,28	18,47	
5	1,14	1,61	2,34	3,00	4,35	6,06	7,29	9,24	11,07	15,09	20,52	
6	1,63	2,20	3,07	3,83	5,35	7,23	8,56	10,64	12,59	16,81	22,46	
7	2,17	2,83	3,82	4,67	6,35	8,38	9,80	12,02	14,07	18,48	24,32	
8	2,73	3,49	4,59	5,53	7,34	9,52	11,03	13,36	15,51	20,09	26,12	
9	3,32	4,17	5,38	6,39	8,34	10,66	12,24	14,68	16,92	21,67	27,88	
10	3,94	4,86	6,18	7,27	9,34	11,78	13,44	15,99	18,31	23,21	29,59	
	No significativo								Significativo			

Nota. En el gráfico se muestra la distribución de tabla de λ^2 . (Ejercicios del seminario nueve: Chi cuadrado | Cristina Soto Moreno, 2011)

En el análisis se obtiene que:

$$\lambda^2_{\text{calculado}} > \lambda^2_{\text{tabla}}$$

$$11,69 > 9,49$$

Se cumple calculado es mayor al de la tabla, por lo tanto, se descarta la hipótesis nula, validando la hipótesis alternativa, es decir que:

El diseño e implementación de un sistema automático de captura de imágenes permite la reconstrucción de modelos digitales 3d utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR.

Capítulo 5

5. Conclusiones

- Se diseñó e implementó un sistema automático de captura de imágenes para reconstrucción de modelos digitales 3d utilizando macrofotografía por apilamiento de enfoque con cámaras DSLR.
- En la investigación teórica se recopiló información de los componentes necesarios a utilizarse en el sistema, además de que se investigó la fundamentación teórica de las técnicas de reconstrucción tridimensional y la técnica de apilamiento de enfoque, delimitando el tamaño de las muestras a estudiarse de unas medidas de 20mm de largo x 13mm de alto.
- Los componentes del sistema automático de captura de imágenes fueron seleccionados por el método de Pugh, dando valores ponderados a cada criterio de selección, eligiendo así la mejor entre las alternativas planteadas.
- Se utilizó la técnica de apilamiento de enfoque con el software libre CombineZP, para generar imágenes completamente nítidas de al menos 3 objetos de estudio.
- Utilizando el software Reality Capture se realizó fotogrametría de objetos estudiados, dando como resultado la reconstrucción de los mismos.

- Se realizó pruebas de reconstrucción tridimensional utilizando el sistema automático captura de imágenes, obteniendo un resultado satisfactorio en los modelos generados.

Capítulo 6

6. Recomendaciones

- Medir correctamente los objetos a reconstruir, otorgándoles al menos un milímetro de seguridad para tener la certeza de que todas las imágenes estarán correctamente encuadradas.
- Asegurarse que la cámara este en modo recepción de infrarrojo para que se puedan tomar automáticamente las imágenes, de la misma forma a pesar del excelente alcance del sistema de captura automático se tiene que evitar que al momento de observar el proceso o manipular elementos se bloquee el emisor IR de la cámara.
- Para crear un modelo digital de buena calidad, se recomienda realizar al menos 20 pasos en una vuelta del objeto, es decir, al menos 20 apilamientos de enfoque.
- Tomar en consideración las recomendaciones para realizar fotogrametría, como por ejemplo evitar superficies brillantes, transparentes, reflectantes y objetos que sean de un solo color o sean matriciales, es decir, que las formas se repitan varias veces en su superficie; procurar que los objetos sean ricos en textura y color.

Bibliografía

- Adobe.com. (2020). *¿Qué es una cámara DSLR?* | Adobe. Recuperado el 19 de diciembre del 2020, de <https://www.adobe.com/es/creativecloud/photography/discover/dslr-camera.html>
- Amazon.com: ComgrowCreality Ender 3. (2021). Recuperado el 18 de marzo del 2021, de <https://www.amazon.com/-/es/ComgrowCreality-Ender-Impresora-reanudación-220x220x250mm/dp/B07BR3F9N6>
- Amazon.com: Tether Tools TetherPro - Cable USB 2.0 a Mini-B de 5 pines, 15.1 ft, color naranja de alta visibilidad: Electronics. (2021). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://www.amazon.com/-/es/Tether-Tools-TetherPro-15-1-visibilidad/dp/B00827MK3S>
- Balawat Diseño Arqueología y Patrimonio Cultural. (2020). Recuperado el 14 de marzo del 2021, de <https://www.balawat.com/#&gid=1&pid=4>
- Bighiognoli, M. (2012). *bigmike.it - infrared remote control for Nikon*. Recuperado el 17 de marzo del 2021, de <http://www.bigmike.it/ircontrol/>
- Birkitt, M. (1999). *El libro completo de la fotografía*. AKAL.
- Canonistas.com. (2018). *¿Que es macro 1:1?* Recuperado el 14 de marzo del 2021, de <https://www.canonistas.com/foros/showthread.php?t=56099>
- Carrasco Jurado, M. L. (2017). *Colorimétrico: proyecto de exposición fotográfica: la psicología del color a través de la fotografía macro de naturaleza*.
- Chango Collaguazo, E., & Domínguez Álvarez, M. (2011). *Diseño e Implementación de un Sistema Fotogramétrico Digital de Corto Alcance 3D*. 1-149.
- Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021-Toda una Vida, (2017).

- Control remoto inalámbrico ML-L3 (infrarrojo) de Nikon.* (2007). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://www.nikon.com.mx/nikon-products/product/remotecords/control-remoto-inalámbrico-ml-l3-%28infrarrojo%29.html>
- Cristina, F., Dapoto, S. H., Vegas, J., Artola, V., Russo, C., & Abásolo, M. J. (2007). Desarrollo de un escáner 3D mediante cámaras estereoscópicas e iluminación láser. *XIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 689-710. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/22312>
- Davies, A. (2010). *Close-Up and Macro Photography*. Elsevier.
- Del Castillo Vivanco, D., Loza Matovelle, D. C., Cortez Pazmiño, B. H., & Erazo Arteago, V. A. (2018). Desarrollo de un escáner 3D de bajo costo implementado por el método de triangulación espacial. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 13(1), 45-48. <https://doi.org/10.24133/cctespe.v13i1.713>
- Displays and Data Visualization With CompactRIO: The Ultimate Multipurpose Controller - NI.* (2021). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://www.ni.com/es-cr/innovations/white-papers/11/displays-and-data-visualization-with-compactrio--the-ultimate-mu.html>
- Ebrahim, M. (2014). 3D Laser Scanners: History, Applications and Future. *LAP LAMBERT Academic Publishing, October*, 104. <https://doi.org/10.13140/2.1.3331.3284>
- Ejercicios del seminario nueve: Chi cuadrado | Cristina Soto Moreno.* (2011). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://cristina92sm.wordpress.com/2011/05/15/ejercicio-del-seminario-nueve-chi-cuadrado/>
- El Círculo de Confusión: Qué Es y Cómo Influye en tus Fotos.* (2016). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://www.dzoom.org.es/descubriendo-que-es-y-como->

influye-el-circulo-de-confusion-en-nuestras-fotografias/

- Erlewine, M. (2011). *Close-up and Macro Photography*. Heart Center Publications.
- Hoddinott, R. (2013). *Digital Macro & Close-up Photography*. Ammonite Press.
- Husillo de bolas diámetro 20mm – Perfiles CNC*. (2020). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://perfilescnc.com/?product=husillo-de-bolas-diametro-20mm>
- Instituto de Biomecánica de Valencia. (2001). Nuevas técnicas para el desarrollo de productos innovadores orientados al usuario. *Revista de Biomecánica*, 1-4.
- Kontogianni, G., Chliverou, R., Koutsoudis, A., Pavlidis, G., & Georgopoulos, A. (2017). *ENHANCING CLOSE-UP IMAGE BASED 3D DIGITISATION WITH FOCUS STACKING*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-421-2017>
- Kuger, B. (2015). *Raspberry-Pi-CNC-Board* | *Protoneer*. Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://blog.protoneer.co.nz/raspberry-pi-cnc-board-hat/raspberry-pi-cnc-board-top/>
- L. Caro, J. (2012). Fotogrametría y modelado 3D: un caso práctico para la difusión del patrimonio y su promoción turística. *IX Congreso Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. TURITEC2012*, 15. <http://hdl.handle.net/10630/5134>
- Lcd Shield 16x2 Lcd1602 Lcd 1602 Teclado Arduino* | *Mercado Libre*. (2021). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-429822423-lcd-shield-16x2-lcd1602-lcd-1602-teclado-arduino-_JM#position=1&type=item&tracking_id=1551e172-8326-403a-b55f-9fb6772991a1
- Longuet-Higgins, H. C. (1981). A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections. *Nature*, 293(5828), 133-135. <https://doi.org/10.1038/293133a0>
- Martínez Cenicerós, M. (2017). *Puesta en marcha de un escáner 3D y aplicación de Ingeniería Inversa y Fabricación Aditiva*. Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <http://www.bvshomeopatia.org.br/saladeleitura/texto6preparomedicamentoshomeo>

paticos.htm%0Ahttps://riunet.upv.es/handle/10251/87979%0Ahttps://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/87979/MARTÍNEZ - Puesta en marcha de un escáner 3D y aplicación de ingeniería

McHugh, S. (2020). *Using Focus Stacking to Extend Depth of Field*. Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://www.cambridgeincolour.com/tutorials/focus-stacking.htm>

Moons, T., van Gool, L., & Vergauwen, M. (2009). *3D Reconstruction from Multiple Images: Principles, Parte 1* (N. P. Inc (Ed.)).

Moya, S. (2015). *Reconstrucción 3D*. Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://www.xatakafoto.com/guias/focus-stacking-como-ampliar-la-profundidad-de-campo-en-fotografia-macro-parte-ii>

Nates, Ó. C. (2014). *Oscar en Fotos*. Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://oscarenfotos.com/2014/06/15/el-enfoque-como-elemento-del-lenguaje-fotografico/>

Neewer LCD Mando Intervalometro Disparador Remoto MC-DC2 para Nikon D90 D7100 D4 | eBay. (2018). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://www.ebay.es/itm/Neewer-LCD-Mando-Intervalometro-Disparador-Remoto-MC-DC2-para-Nikon-D90-D7100-D4-/191698767322>

Nextion HMI Simulation - Sonsivri. (2021). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <http://www.sonsivri.to/forum/index.php?topic=62909.0>

Nieto, F. (2012). *Fotografía Macro*.

Nikon | Imaging Products | Nikon D7200. (2021). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://imaging.nikon.com/lineup/dslr/d7200/>

NiSi Macro Focusing Rail. (2021). NM-180 With 360-Degree NISI-NM-180 B&H. Recuperado el 19 de marzo del 2021, de

<https://www.bhphotovideo.com/c/product/1574871->

[REG/nisi_nisi_nm_180_nisi_macro_focusing_rail.html](https://www.bhphotovideo.com/c/product/1574871-REG/nisi_nisi_nm_180_nisi_macro_focusing_rail.html)

Parras, D., Romero, L., Cavas, F., Nieto, J., Cavañete, F., & Fernandez-Pacheco, D. (2016). Use of 3D scanning and reverse engineering for the prototyping of mechanical parts. *20th International Congress on Project Management and Engineering*.

Piñera Parrilla, J. M. (2017). *Diseño e implementación de un prototipo funcional para focus-stacking y digitalizado 3D*.

<http://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/43577>

Ponsa, P., Díaz, M., & Català, A. (2006). Creación de guía ergonómica para el diseño de interfaz de supervisión. *VII Congreso Internacional de Interacción Persona-Ordenador, June 2014*, 13-17.

http://www.researchgate.net/profile/Andreu_Catala/publication/238743584_Creacin_de_gua_ergonmica_para_el_diseo_de_interfaz_de_supervisin/links/0deec52952199734f8000000.pdf

Robayo, D., Valderrama, Z., & Jaime, M. (2003). Reconstrucción 3D de objetos discontinuos usando el método de código de grises. *Revista Colombiana de Física, Vol. 35*, 348-352.

Santos, D. (2015). *blog.foto24.com*. Recuperado el 19 de marzo del 2021, de

<https://blog.foto24.com/tecnica-del-focus-stacking-que-es-y-como-se-realiza/>

Shield Cnc V3 Para Arduino Uno 4 Ejes | Mercado Libre. (2021). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-429456150-shield-cnc-v3-para-arduino-uno-maquina-grabado-laser-4-ejes->

[_JM#position=1&type=item&tracking_id=a7481621-951a-4a1a-83de-e9a9cc30ff66](https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-429456150-shield-cnc-v3-para-arduino-uno-maquina-grabado-laser-4-ejes-_JM#position=1&type=item&tracking_id=a7481621-951a-4a1a-83de-e9a9cc30ff66)

Shield Ramps 1.4 Controlador Impresora 3d Arduino Mega | Mercado Libre. (2021).

- Recuperado el 19 de marzo del 2021, de https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-429776784-shield-ramps-14-controlador-impresora-3d-arduino-mega-_JM#redirectedFromSimilar=https%3A%2F%2Farticulo.mercadolibre.com.ec%2FMEC-429120382-shield-ramps-14-controlador-impresora-3d-arduino-mega-_JM
- Silva Oquendo, A. J. (2011). *La Macrofotografía de Plantas Nativas de Chimborazo como Base en el Diseño de un Catálogo de Retículas* [Universidad Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esoch.edu.ec/handle/123456789/1088>
- StackShot Macro Rail Package*. (2020). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de <https://cognisys-inc.com/stackshot-macro-rail-package.html>
- Tornillo Sin Fin 8mm 4 Entradas 400mm Largo+tuerca+camisa | Mercado Libre*. (2020). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-429489483-tornillo-sin-fin-8mm-4-entradas-400mm-largotuercacamisa-_JM
- TORNILLO T8-2D8 400MM 8MM 1 HILO PITCH 2MM + TUERCA – Grupo Electrostore*. Recuperado el 19 de marzo del 2021, de (2020). <https://grupoelectrostore.com/shop/cnc/tornillo-t8-2d8-400mm-8mm-1-hilo-pitch-2mm-tuerca/>
- Torres, J. C., Arroyo, G., Romo, C., & De Haro, J. (2012). 3D using Structure from Motion. *CEIG-Spanish Computer Graphics Conference*, 1-10.
- Wang, W. (2010). *Reverse Engineering: Technology of Reinvention* (CRC (Ed.)).
- WeMacro rail (100mm type, with power bank cable for outside) – Wemacro Rail*. Recuperado el 19 de marzo del 2021, de (2016). <https://www.wemacro.com/?product=wemacro-rail>
- Yongnuo YN 60mm f/2 NE MF Lens for Nikon F*. (2020). Recuperado el 19 de marzo del 2021, de https://www.bhphotovideo.com/c/product/1506437-REG/yongnuo_yn60mm_f2ne_mf_yn_60mm_f_2_ne.html

ANEXOS