



**PROTOTIPO ELECTROMECAÁNICO ORIENTADO A LA CAPTURA
FOTOGRAFICA MULTIANGULAR DE PIEZAS PERTENECIENTES A LA
COLECCIÓN ARQUEOLÓGICA DE LA UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA**

CIRO ALEXANDER RUEDA GOMEZ

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

JOHN ALEXANDER TABORDA, PH.D.

Director.

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

SANTA MARTA, DTCH

2016

RESUMEN

Este documento describe el desarrollo e implementación de un prototipo electro-mecánico destinado a facilitar el proceso de digitalización de piezas arqueológicas pertenecientes al laboratorio de arqueología de la Universidad del Magdalena.

La digitalización de las piezas se ha realizado anteriormente mediante fotogrametría, lo cual consiste en generar modelos tridimensionales a partir de un conjunto de fotografías. El prototipo en cuestión simplifica la tarea de fotografiar piezas desde distintos ángulos. Mediante la automatización del posicionamiento y disparo de la cámara con respecto a la pieza se espera reducir el tiempo del proceso de captura así como mejorar la precisión y calidad de las tomas.

Se pretende complementar proyectos desarrollados con anterioridad basados en galerías interactivas de la colección arqueológica de la Universidad del Magdalena.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	3
1 DESCRIPCION DEL PROYECTO.....	11
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	12
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	13
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	13
1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES	14
1.4.1 ALCANCES	14
1.4.2 LIMITACIONES	15
1.5 MARCO DE REFERENCIA.....	16
1.5.1 ANTECEDENTES	16
1.5.2 MARCO TEORICO.....	17
1.6 DISEÑO METODOLOGICO	24
2 DESARROLLO DEL PROTOTIPO	25
2.1 PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN.....	25
2.1.1 GENERACION DEL MODELO TRIDIMENSIONAL	25
2.1.2 GEOMETRIA DEL PROCESO DE ADQUICISION	29
2.1.3 ADQUISICION DE DATOS	33
2.1.4 DELIMITACION DE DIMENSIONES	35
2.1.5 ADECUACION DE LA ESCENA.....	36
2.2 DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO	38
2.2.1 SISTEMA DE POCISIONAMIENTO	38
2.2.2 SISTEMA DE CONTROL	46
2.3 RESULTADOS.....	56
2.3.1 ADQUISICION DE IMAGENES	62
2.3.2 TIEMPOS DE CAPTURA.....	68
2.3.3 GENERACIÓN DE MODELOS.....	70
3 CONCLUSIONES	73
4 PRESUPUESTO	91
5 REFERENCIAS.....	91
6 ANEXOS	95

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Detección de personas mediante visión artificial	18
Ilustración 2 - Tabla comparativa entre métodos de digitalización [8]	20
Ilustración 3 – Control a lazo cerrado	21
Ilustración 4 - Motor paso a paso	22
Ilustración 5 - Variación en la relación de transmisión de una bicicleta	23
Ilustración 6 - Interfaz gráfica VisualSFM	26
Ilustración 7 - Interfaz de Agisoft PhotoScan	27
Ilustración 8 - Interfaz de AutoDesk Remake	28
Ilustración 9 - Sistema de referencia orbital cámara-objeto	30
Ilustración 10 - Captura multi-orbital	31
Ilustración 11 - Geometría del proceso de captura	31
Ilustración 12 - Sistema guía-plataforma	32
Ilustración 13 - Campo de visión de la Picamera a 1 metro	34
Ilustración 14 - Dimensiones generales del prototipo	35
Ilustración 15 - Captura con adecuación de escena	37
Ilustración 16 - Rodamiento para carga axial	39
Ilustración 17 - Transmisión de la plataforma	40
Ilustración 18 - Sistema de posicionamiento de la plataforma	40
Ilustración 19 - Motor DC con motorreductor no reversible	41
Ilustración 20 - Sistema de fijación del carro	42
Ilustración 21 - Posicionamiento angular de la cámara	43
Ilustración 22 - Carro de posicionamiento	44
Ilustración 23 - Carro de posicionamiento (vista posterior)	44
Ilustración 24 - Estructura del dispositivo (vista lateral)	45
Ilustración 25 - Estructura del prototipo (vista posterior)	45
Ilustración 26 - Diagrama de conexión del DRV8825 [10]	48
Ilustración 27 - Potenciómetro lineal de 10 vueltas	51
Ilustración 28 - Modulo puente H L298N	53
Ilustración 29 - Interfaz del software DigicamControl	54
Ilustración 30 - Interfaz de configuración de la comunicación serial	54
Ilustración 31 - Placa de desarrollo electrónico Arduino Uno	55
Ilustración 32 - Interfaz de captura	56

INDICE DE ILUSTRACIONES (Continuación)

Ilustración 33 - Botonera de comandos	56
Ilustración 34 - Prototipo terminado	58
Ilustración 35 - Sistema de control del prototipo	58
Ilustración 36 - Prototipo en funcionamiento (vista lateral)	59
Ilustración 37 - Prototipo en funcionamiento (vista posterior)	59
Ilustración 38 - Prueba de funcionamiento del prototipo	61
Ilustración 39 - Mando a 10° con incrementos rotacionales de 60°	62
Ilustración 40 - Mando a 40° con incrementos rotacionales de 60°	63
Ilustración 41 - Mando a 70° con incrementos rotacionales de 60°	63
Ilustración 42 - Frutero a 10° con incrementos rotacionales de 60°	64
Ilustración 43 - Frutero a 40° con incrementos rotacionales de 60°	65
Ilustración 44 - Frutero a 70° con incrementos rotacionales de 60°	65
Ilustración 45 - Taza a 10° con incrementos rotacionales de 60°	66
Ilustración 46 - Taza a 40° con incrementos rotacionales de 60°	67
Ilustración 47 - Taza a 70° con incrementos rotacionales de 60°	67
Ilustración 48 - Geometría de captura prueba n°1, Agisoft PhotoScan	70
Ilustración 49 - Modelo tridimensional prueba n°1, Agisoft PhotoScan	71
Ilustración 50 - Geometría de captura prueba n°2, Agisoft PhotoScan	71
Ilustración 51 - Modelo tridimensional prueba n°2, Agisoft PhotoScan	72
Ilustración 52 - Geometría de captura prueba n°3, Agisoft PhotoScan	72
Ilustración 53 - Modelo tridimensional prueba n°3, Agisoft PhotoScan	73
Ilustración 54 - Geometría de captura prueba n°1, VisualSFM.....	74
Ilustración 55 - Nube de puntos densa prueba n°1, VisualSFM	74
Ilustración 56 - Geometría de captura prueba n°2, VisualSFM.....	75
Ilustración 57 - Nube de puntos densa prueba n°2, VisualSFM	75
Ilustración 58 - Geometría de captura prueba n°3, VisualSFM.....	76
Ilustración 59- Nube de puntos densa prueba n°3, VisualSFM	76
Ilustración 60 - Geometría de captura prueba n°1, Autodesk Remake	77
Ilustración 61 - malla tridimensional prueba n°1, Autodesk Remake.....	78
Ilustración 62 -Modelo tridimensional prueba n°1, Autodesk Remake	78
Ilustración 63 - Geometría de captura prueba n°2, Autodesk Remake	79
Ilustración 64 - Malla tridimensional prueba n°2, Autodesk Remake.....	79

INDICE DE ILUSTRACIONES (Continuación)

Ilustración 65 - Modelo tridimensional prueba n°2, Autodesk Remake	80
Ilustración 66 - Geometría de captura prueba n°3, Autodesk Remake	80
Ilustración 67 - - Mallado tridimensional prueba n°3, Autodesk Remake	81
Ilustración 68 - Modelo tridimensional prueba n°3, Autodesk Remake	81
Ilustración 69 - Piezas digitalizadas (1 a 6).....	83
Ilustración 70 - Piezas digitalizadas (7 a 12).....	83
Ilustración 71 - Piezas digitalizadas (13 a 18).....	83
Ilustración 72 - Piezas digitalizadas (19 a 24).....	84
Ilustración 73 - Piezas digitalizadas (25 a 30).....	84
Ilustración 74 - Modelo 3D de jarrón con figura zoo antropomórfica.....	86
Ilustración 75 - Modelo 3D de instrumento de viento con forma antropomórfica.....	87
Ilustración 76 - Modelo 3D de urna cerámica	87

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Comparativa entre los programas de reconstrucción	29
Tabla 2 - Características motor paso a paso implementado.....	39
Tabla 3 - Características del controlador DRV8825	46
Tabla 4 - Incrementos según el multiplicador de paso	47
Tabla 5 - Configuración del multiplicador de microstepping [11]	48
Tabla 6 - Incrementos rotacionales de la plataforma.	50
Tabla 7 - Tensión de referencia por posición de la cámara	52
Tabla 8 - Características del L298N	52
Tabla 9 - interfaces usadas de la tarjeta Arduino Uno	55
Tabla 10 - Tiempos de captura para la prueba n°1	68
Tabla 11 - Tiempos de captura para la prueba n°2.....	68
Tabla 12 - Tiempos de captura para la prueba n°3.....	69
Tabla 13 - Tiempo de captura prueba aplicada.....	85

1 DESCRIPCION DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La digitalización del patrimonio cultural se ha convertido en una grandiosa herramienta para la difusión y masificación del arte, la cultura y la historia. Recientemente dentro de la Universidad del Magdalena a través de proyectos multidisciplinarios se ha incentivado la digitalización de las colecciones pertenecientes a su laboratorio de arqueología mediante la elaboración y exposición de modelos 3D de un conjunto de piezas cerámicas a partir de fotografías [1].

El problema radica en que el fotografiado de cada pieza es un proceso demorado y repetitivo. Estas iniciativas pierden atractivo si se fundamentan en procesos que demandan una gran cantidad de tiempo, además de la asignación de recursos humanos e institucionales que implica la manipulación y el fotografiado de las piezas las cuales ya de por si son tareas extenuantes y delicadas. A partir de lo anterior surge la pregunta de investigación sobre la cual se fundamenta este proyecto:

¿Cómo reducir el tiempo requerido por el proceso de documentación fotográfica de piezas arqueológicas del Laboratorio de Arqueología de la Universidad del Magdalena?

1.2 JUSTIFICACIÓN

La digitalización de piezas arqueológicas y artísticas es una práctica que permite conservar reproducciones altamente fieles a los objetos originales para así poder exponerlos al público de una manera segura y práctica. Esto es especialmente útil cuando se trata de objetos que hacen parte del patrimonio cultural de la humanidad y que por lo tanto se trata de piezas de valor incalculable.

Este proyecto desarrolla una herramienta que permita simplificar la adquisición de imágenes para la digitalización mediante técnicas fotogramétricas de parte de las colecciones arqueológicas conservadas por el laboratorio de arqueología de la Universidad del Magdalena. Se pretende reducir los tiempos y costos implícitos en el proceso de digitalización, así como complementar propuestas previas e incentivar futuras iniciativas que promuevan el conocimiento de nuestro patrimonio cultural e histórico. Facilitando este tipo de procesos, la Universidad del Magdalena puede difundir de forma más eficiente parte de nuestra historia ante la comunidad universitaria y ante la región en general.

Finalmente se espera incentivar la investigación y el desarrollo de propuestas en el área del procesamiento digital de imágenes y automatización de procesos. Así como en tecnologías emergentes en nuestro país como lo son el escaneo y la impresión 3D.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo electromecánico que permita automatizar el proceso de captura de imágenes destinadas a la posterior digitalización en 3D mediante fotogrametría digital.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Establecer un sistema de referencia fijo entre el objeto a digitalizar y la cámara que permita estandarizar el proceso de captura.
- Diseñar un dispositivo que permita Controlar la posición de la cámara con respecto a la superficie del objeto que se desea digitalizar.
- Reducir los tiempos de adquisición de imágenes con respecto a la captura manual.

1.4 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.4.1 ALCANCES

Se plantea la automatización del proceso de captura fotográfica a través de un prototipo que permita tomar fotos de un objeto desde diferentes ángulos. Estas fotografías podrán ser usadas posteriormente para elaboración de modelos tridimensionales mediante software especializado como por ejemplo ReMake® de Autodesk®. Por tanto con el dispositivo no se pretende generar los modelos 3D sino realizar el proceso de adquisición de datos.

Por motivos de practicidad y debido a que se trata de un prototipo se hace necesario limitar el tamaño de las piezas a digitalizar, por lo que se establecieron unas dimensiones de trabajo descritas por un casquete esférico de 20 centímetros de radio aproximadamente con el fin de conservar una distancia mínima de enfoque entre la cámara y la superficie. Además se delimitó la masa de las piezas hasta 10 kilogramos, de modo que la inercia provocada por una masa mayor no altere el funcionamiento de la plataforma rotativa implementada. Dependiendo de la geometría del objeto y la longitud focal de la cámara utilizada es posible digitalizar piezas que excedan por poco estas dimensiones, sin embargo se ha desarrollado el prototipo teniendo en cuenta dichos parámetros.

1.4.2 LIMITACIONES

- Las piezas a las que va dirigido el dispositivo prototipo son de un valor incalculable, por lo que por la seguridad de dicho patrimonio, cualquier prueba se deberá hacer con objetos de característica similares, hasta que se logre un proceso de captura que asegure la integridad de cualquier pieza.

- Se requiere adecuar el proceso de captura al software ya que lo contrario implicaría desarrollar algoritmos de fotogrametría especializados, por lo tanto hay que tener en cuenta las condiciones adecuadas en cuanto a sistemas de referencia y tipos de superficies bajo la cuales opera el software utilizado.

- Las herramientas y materiales para la elaboración del prototipo pueden no ser los adecuados debido a limitaciones en presupuesto y/o disponibilidad.

1.5 MARCO DE REFERENCIA

1.5.1 ANTECEDENTES

Cada vez son más los museos y laboratorios arqueológicos que optan por digitalizar sus colecciones con el fin de preservarlas en formato digital, realizar exposiciones y hasta para realizar estudios sobre los modelos digitalizados sin necesidad de exponer las piezas originales a la manipulación constante.

Un gran ejemplo de esta tendencia se trata del Museo Británico el cual ha realizado diversos proyectos de digitalización de sus exposiciones, tales como su proyecto *Ancient lives new Discoveries* [2] en la cual complementaban con modelos digitales la exposición de ocho momias de Sudan y el antiguo Egipto y la digitalización de su colección de relieves asirios en 2014 [3].

Una iniciativa muy interesante para la difusión de la historia a través de la digitalización 3D es la implementada por el American Museum of Natural History, bajo el nombre de *capturing Dinosaurs: Reconstructing Extinct Species Through Digital Fabrication* [4], en la que se enseña a jóvenes sobre los procesos y tecnologías usadas por los paleontólogos para el estudio y la reconstrucción digital de dinosaurios a partir de fósiles.

El programa de ingeniería electrónica de la Universidad del Magdalena a través de proyectos de investigación como el desarrollado por Herrera y Mercado [1] en el que se plantea un método de creación de modelos 3D a partir

de fotografías, pretende incentivar la digitalización de las colecciones pertenecientes al laboratorio de arqueología del alma máter.

Una alternativa similar a la propuesta en este proyecto es *Pixelio*. Se trata de un dispositivo pensado para trabajar con la aplicación móvil *123D catch*® de Autodesk® y que permite automatizar una serie de capturas panorámicas con el teléfono móvil alrededor de una plataforma. Con esto se logra mejorar la calidad de las fotografías y obtener modelos más consistentes. A pesar de ser compacto y relativamente barato tiene las desventajas de que por cómo está diseñado solo puede digitalizar objetos de tamaño reducido y mediante la aplicación móvil [5].

1.5.2 MARCO TEORICO

Para el desarrollo del proyecto fue necesario tener claros una serie de conceptos clave con respecto a los procesos de digitalización de objetos y control del dispositivo. A día de hoy la mayoría de desarrollos tecnológicos y soluciones electrónicas poseen un fuerte componente interdisciplinar tanto en la etapa de desarrollo y fabricación como en su proceso de implementación. Se hace necesario por tanto conocer una serie de conceptos interdisciplinares que permitan el desarrollo adecuado del prototipo.

1.5.2.1 VISION ARTIFICIAL

Una de las grandes ambiciones de la robótica y de disciplinas afines a esta es lograr que las maquinas puedan observar y comprender el mundo tal y como nosotros los seres humanos lo hacemos. A pesar de parecer un concepto sencillo no lo es tanto si analizamos a profundidad lo que esto implica. Automatizar tareas que son triviales para nosotros requiere extraer datos multidimensionales del mundo real a través de imágenes digitales y convertirlas en información numérica o simbólica que permita analizarla y tomar decisiones con base en esta.



Ilustración 1 - Detección de personas mediante visión artificial

1.5.2.2 FOTOGRAMETRIA Y SFM

La fotogrametría consiste en una técnica mediante la cual se logran determinar las características tridimensionales de un objeto o escena a partir de una serie de fotografías tomadas desde diferentes perspectivas.

La fotogrametría es una técnica bastante antigua fundamentada en el establecimiento de puntos comunes entre imágenes tomadas de forma controlada y con cámaras calibradas, con el fin esencial de tomar mediciones entre dichos puntos, aunque en la práctica moderna sea posible extraer modelos 3D más o menos eficaces. Sin embargo el *Structure from Motion (SFM)*, es una técnica que aunque se inspira en la fotogrametría procede del mundo de la visión artificial y permite realizar modelos 3D a partir de colecciones de imágenes no estructuradas, por lo cual se propone como una estrategia más polivalente y robusta [6].

La Fotogrametría Digital Automatizada utiliza imágenes realizadas en principio con cualquier cámara fotográfica y desde cualquier perspectiva del objeto a digitalizar, con la condición de que todas las partes del modelo sean visibles al menos desde dos ángulos distintos para su correcta correlación. El primer trabajo a realizar es la alineación de las fotografías que se van a utilizar para la reconstrucción del modelo. Esta labor se realiza automáticamente, e incluye la calibración y corrección de todas las imágenes partiendo de sus datos EXIF. El procedimiento está basado en la detección de patrones. Esta es una herramienta de vital importancia en el campo de visión artificial, pues se trata del censado, agrupación y extracción de características de imágenes digitales que permitan interpretarlas más fácilmente. Se hace necesario clasificar características comunes entre el conjunto de imágenes para luego establecer patrones de correlación que permitan vincularlas en un sistema de referencia común [7]. El conjunto de posiciones de las cámaras junto con las propias

fotografías, son utilizadas para la siguiente fase que es la construcción de la geometría del modelo, es decir, la construcción de la malla de polígonos en 3D que definen la superficie del modelo.

La digitalización por técnicas fotogramétricas se rivaliza muchos ámbitos por los sistemas basados en sensores 3D activos, sin embargo comparativamente el método más adecuado para cada aplicación puede variar en función de varios factores (*Ilustración 2*). Sin embargo desde sus inicios la fotogrametría se ha considerado un sistema preciso y con multitud de ventajas, tales como la extracción de información métrica precisa y la versatilidad de implementación a través de instrumentos relativamente económicos [8].

	Escáner triangulación <i>Triangulating Scanner</i>	Escáner (tiempo de vuelo) <i>Laser Scanner (time of flight)</i>	Fotogrametría automatizada <i>Automated photogrammetry</i>
Coste económico <i>Economic cost</i>	Medio <i>Medium</i>	Alto <i>High</i>	Bajo <i>Low</i>
Tiempo elaboración <i>Implementation time</i>	Muy alto <i>Very long</i>	Alto <i>Long</i>	Bajo <i>Short</i>
Dificultad <i>Level of difficulty</i>	Alta <i>High</i>	Alta <i>High</i>	Baja <i>Low</i>
Tiempo postproducción <i>Post-production time</i>	Muy alto <i>Very long</i>	Muy alto <i>Very long</i>	Bajo <i>Short</i>
Precisión <i>Level of accuracy</i>	Muy alta <i>Very high</i>	Alta <i>High</i>	Alta <i>High</i>
Resultado <i>Results</i>	Óptimo <i>Optimum</i>	Óptimo <i>Optimum</i>	Óptimo <i>Optimum</i>
Mejor aplicación <i>Best application</i>	Proximidad <i>Close up</i>	Media y larga distancia <i>Medium-long distance</i>	Complementario <i>Complementary</i>
Peor aplicación <i>Worst application</i>	Grandes objetos o de difícil acceso <i>Large objects or ones that are difficult to access</i>	Objetos pequeños y con detalle <i>Small, detailed objects</i>	Objetos sin cambio tonal <i>Objects without tonal variation</i>

Ilustración 2 - Tabla comparativa entre métodos de digitalización [8]

1.5.2.3 CONTROL REALIMENTADO

Un sistema de control realimentado es aquel que mantiene una relación entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control. Son denominados también sistemas de control a lazo cerrado.

Un ejemplo de control en bucle cerrado es el control de temperatura de una habitación mediante un termostato. Este elemento compara la temperatura indicada por el selector de referencia con la temperatura ambiente de la habitación, proporcionando, en el caso de no ser iguales, una señal activa que actúa sobre la caldera para ponerla en marcha, hasta que las diferencias de temperaturas sean cero.

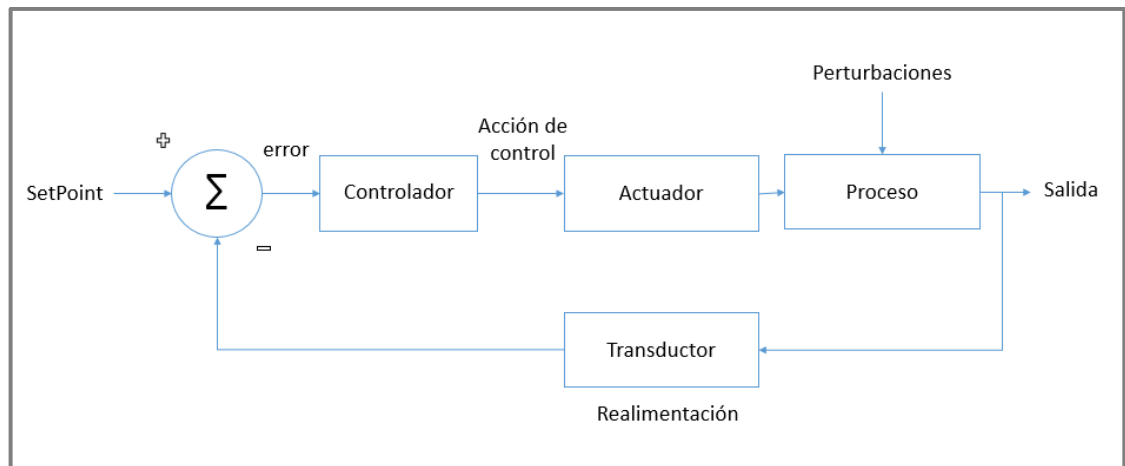


Ilustración 3 – Control a lazo cerrado

1.5.2.4 ACTUADORES

Un actuador como su nombre lo indica es un dispositivo que permite a un sistema electrónico actuar sobre un proceso que se desee controlar; se trata generalmente de un transductor electro-mecánico, es decir un dispositivo que convierte una magnitud eléctrica en energía mecánica a modo de movimiento angular o lineal.

1.5.2.5 MOTOR PASO A PASO

Los motores paso a paso tienen un comportamiento del todo diferente al de los motores de corriente continua. En primer lugar, no giran libremente por sí mismos. Los motores paso a paso, como lo indica su nombre, avanzan girando por pequeños pasos. También difieren de los motores de CC en la relación entre velocidad y torque (un parámetro que también es llamado "par motor" y "par de giro"). Los motores de CC no son buenos para ofrecer un buen torque a baja velocidad sin la ayuda de un mecanismo de reducción. Los motores paso a paso, en cambio, trabajan de manera opuesta: su mayor capacidad de torque se produce a baja velocidad [9].

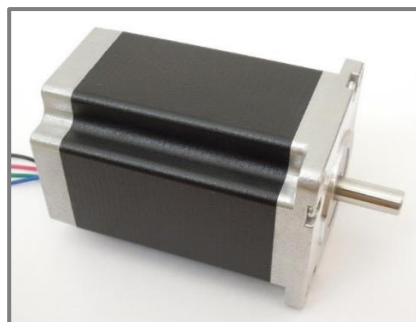


Ilustración 4 - Motor paso a paso

1.5.2.6 RELACION DE TRANSMISION

En mecánica se habla de relación de transmisión con respecto a la diferencia de velocidades entre los extremos de un sistema de transmisión de potencia mecánica, normalmente se habla de sistemas rotativos como engranes, poleas, bandas y cadenas, es un principio aplicado en muchas de las herramientas y dispositivos que usamos a diario. Muchos de los dispositivos que implementan motores hacen uso de reductores que permitan obtener una velocidad o un par motor adecuado para cada aplicación.

En una bicicleta por ejemplo, al cambiar el piñón de la rueda por uno más pequeño se logra transmitir mayor velocidad de los pedales a esta. Al mismo tiempo la potencia transmitida disminuye.

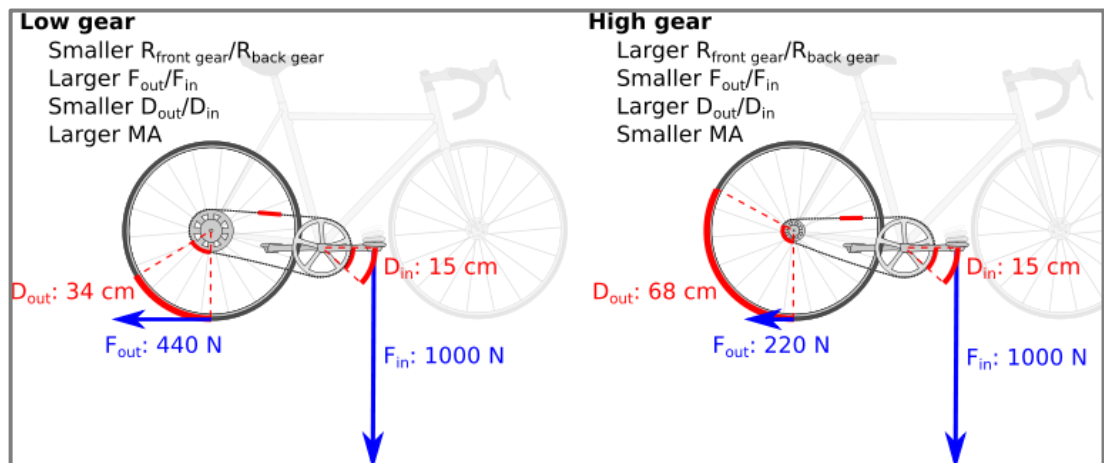


Ilustración 5 - Variación en la relación de transmisión de una bicicleta

1.6 DISEÑO METODOLOGICO

Este proyecto se basa en un proceso de investigación y desarrollo, considerando y evaluando alternativas y métodos a lo largo de toda la realización del mismo. Esto con el fin de implementar una solución adecuada al problema propuesto. Para la documentación de este trabajo se estableció estructurarla en dos etapas principales, las cuales a su vez se descomponen en sub-etapas que permitan demostrar el desarrollo progresivo del trabajo.

Etapas de planteamiento: En esta etapa se definen los aspectos principales sobre los cuales se va a desarrollar el prototipo. Desde el medio de adquisición de imágenes, pasando por la geometría de captura y el método de generación de los modelos tridimensionales.

Etapas de diseño del prototipo: durante esta parte se detallan los pormenores del diseño y construcción del prototipo, partiendo con el diseño del sistema de posicionamiento que cumpla con la geometría establecida anteriormente para luego descomponer el diseño e implementación del sistema de control de cada uno de los subsistemas que conforman el prototipo.

2 DESARROLLO DEL PROTOTIPO

2.1 PLANTEAMIENTO DE LA SOLUCIÓN

Con el fin de depurar el planteamiento de la solución es conveniente considerar algunos de los posibles caminos por los cuales se puede desarrollar dicha solución, así como sus respectivas implicaciones. Por tanto se analizan los procesos sobre los cuales se fundamenta este trabajo con el fin de estructurar adecuadamente el desarrollo del mismo.

2.1.1 GENERACION DEL MODELO TRIDIMENSIONAL

El prototipo a desarrollar está pensado para aplicar una técnica de reconstrucción digital conocida como SFM (Structure From Motion). Como se aclaró anteriormente, se basa en la fotogrametría y se desarrolla a partir de un conjunto de fotografías del objeto que se planea digitalizar.

Debido a que es un proceso basado en visión artificial es necesario implementar un software que permita la correlación y la estructuración de las imágenes en un modelo tridimensional. Existen alternativas variadas en el campo de la fotogrametría, desde librerías para lenguajes y entornos de programación hasta software independiente dedicado al proceso de reconstrucción.

Enfocándose en el último grupo y teniendo en cuenta que el software de reconstrucción sirve como una herramienta de evaluación de la funcionalidad del prototipo y no como parte fundamental del mismo, se estableció trabajar con tres de las principales alternativas para la elaboración de modelos tridimensionales a partir de fotografías:

- **VisualSFM:** Se trata de una herramienta con interfaz de usuario grafica para la reconstrucción 3D a partir de SFM basada en código abierto, su objetivo es crear una nube de puntos en 3D, con la ayuda de diversas herramientas. Estas nubes de puntos están formadas por simples puntos descritos por unas coordenadas espaciales XYZ y unos valores RGB que serán los encargados de restituir la textura original a través de lo que se conoce como nubes de puntos densas.

Las ventajas que tiene este software además de ser código abierto es que representa una alternativa flexible y eficiente, aunque puede no ser tan completa y fácil de usar como las demás alternativas.

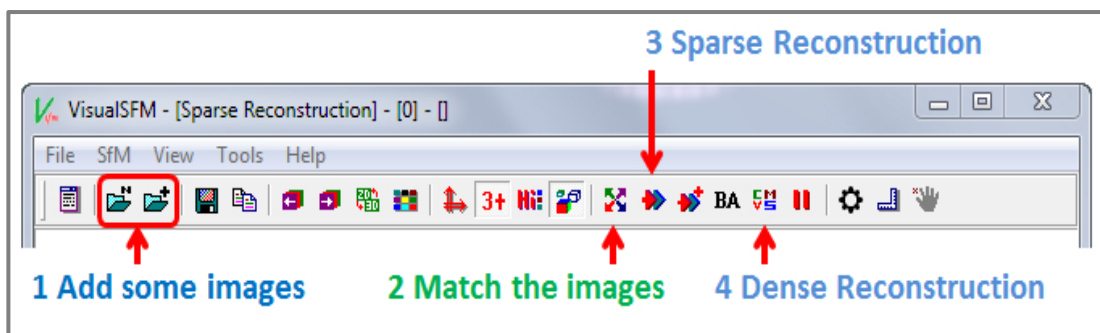


Ilustración 6 - Interfaz gráfica VisualSFM

- **Agisoft PhotoScan:** Este programa representa una alternativa muy completa y robusta para el procesamiento fotogramétrico. A pesar de realizar el procesamiento localmente al igual que *VisualSFM* posee la desventaja de que debido a su robustez, requiere de mayor potencia de cómputo y puede llegar a tomar mucho más tiempo la reconstrucción dependiendo de las especificaciones técnicas del equipo en el que se ejecute. Además se trata de un software de pago. Aun así provee licencias educativas con las mismas funcionalidades a un precio reducido, llegando a costar 60 USD (Dólares estadounidenses) la versión estándar y 550 USD la versión profesional y es posible probarlo antes con una licencia de prueba de 30 días para que se pueda determinar si es el medio adecuado para nuestro fin.

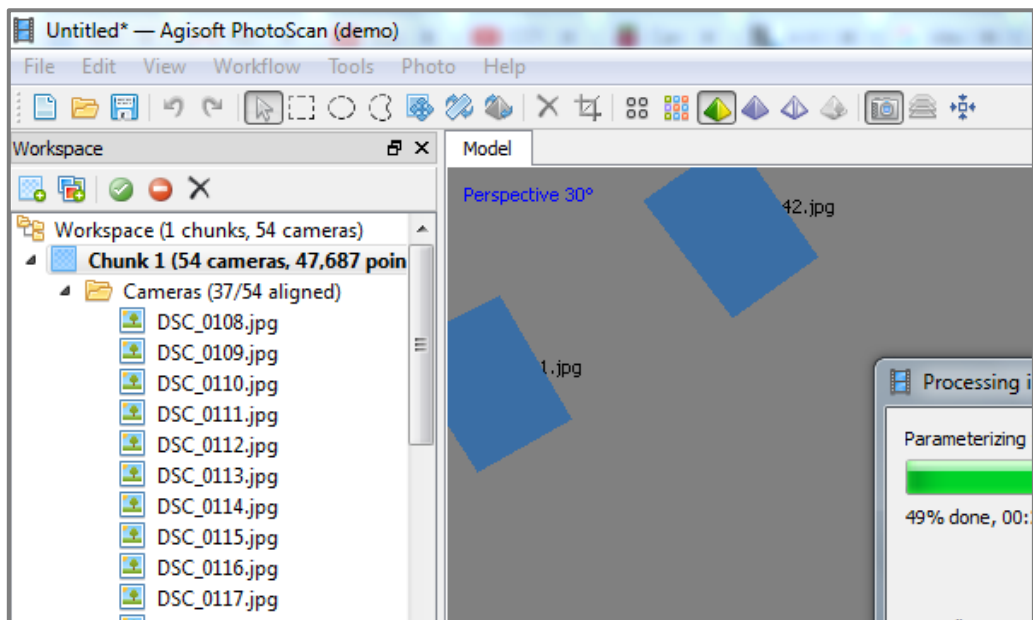


Ilustración 7 - Interfaz de Agisoft PhotoScan

- **Autodesk Remake:** Anteriormente conocido como 123D Catch, Remake hace parte del repertorio de aplicaciones de *AutoDesk* enfocados al procesamiento y elaboración de modelos 3D y puede adquirirse una licencia educativa de manera gratuita. Remake posee una interfaz gráfica más amigable que las aplicaciones antes mencionadas y cuenta funcionalidades para editar y pulir los modelos digitalizados, imprimir directamente mediante una impresora 3D y exportar el modelo en variedad de formatos. Su mayor ventaja es la de poder realizar el procesamiento de las fotografías de forma remota, es decir, sube las capturas a los servidores de la aplicación y descarga el modelo una vez procesado. Esto permite quitarle la carga del procesamiento al equipo local.

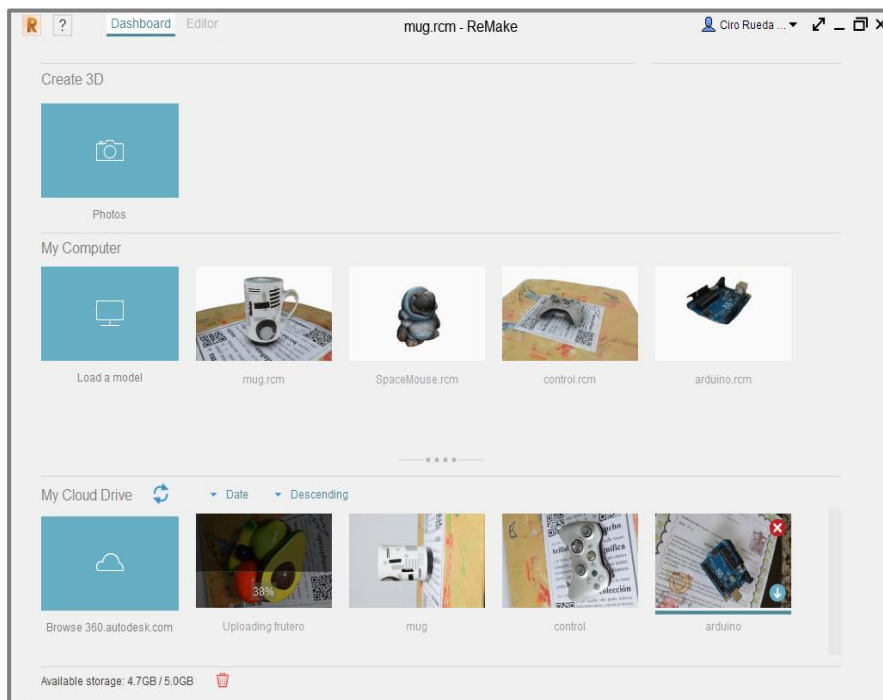


Ilustración 8 - Interfaz de AutoDesk Remake

Se evaluó cualitativamente cada una de las tres alternativas, teniendo en cuenta aspectos claves a la hora de decidir por cual opción decantarse, sin embargo más adelante durante la etapa de pruebas se evaluara el desempeño real por medio de los modelos obtenidos con el prototipo.

En la *Tabla 1* se plasma una comparativa según propia opinión de las tres alternativas contempladas.

Tabla 1 - Comparativa entre los programas de reconstrucción

	VisualSFM	Agisoft PhotoScan	Autodesk Remake
Requisitos de hardware	MODERADO	ALTO	MODERADO
Velocidad de procesamiento	ALTA	MEDIA	ALTA
costo	GRATUITO	60 USD	GRATUITO
Facilidad de uso	MEDIA	MEDIA	ALTA
Fortaleza	CODIGO ABIERTO	CONFIGURABILIDAD	PROCESAMIENTO REMOTO

2.1.2 GEOMETRIA DEL PROCESO DE ADQUICISION

El proceso de reconstrucción mediante SFM requiere realizar capturas del sujeto desde diferentes ángulos. Definiendo una geometría fija para el proceso de adquisición se logra simplificar la captura de imágenes y el diseño del sistema de posicionamiento cámara-objeto. Teniendo en cuenta el principio de captura manual, el cual consiste en moverse alrededor del objeto a digitalizar y tomar fotografías desde todos los ángulos posibles se puede establecer que en términos generales la cámara estaría realizando una trayectoria a modo de orbita alrededor del objeto.

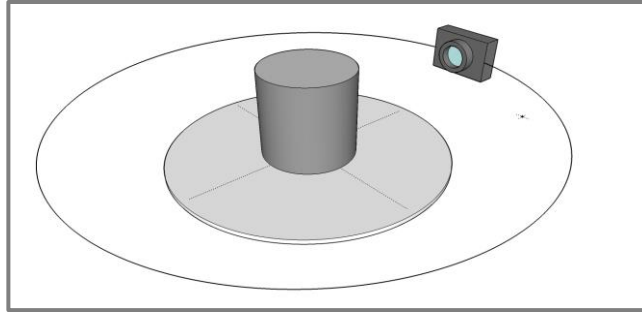


Ilustración 9 - Sistema de referencia orbital cámara-objeto

En la mayoría de los casos un conjunto de planos frontales no aportan suficiente información como para reconstruir la totalidad del objeto por lo cual dependiendo de la geometría del objeto se hace necesario describir por lo menos otra órbita. Esta última con una orientación oblicua de la cámara y desfasada verticalmente con respecto a la órbita original con el fin de aportar transformaciones geométricas de los planos anteriormente capturados.

Aumentando el número de órbitas y la cantidad de fotografías por cada órbita se incrementa a su vez el volumen de información que el software puede usar para reconstruir el objeto, sin embargo eso se traduce en más datos que procesar y por tanto un mayor tiempo de reconstrucción.

Respecto a lo anterior, dependiendo de la complejidad de la superficie a digitalizar puede ser necesario un menor o un mayor número de muestras, buscando siempre un equilibrio ya que tomar muy pocas muestras puede provocar errores en la reconstrucción y hasta modelos incompletos mientras que sobre-muestrear la pieza conlleva un aumento del volumen de datos que a partir de cierto punto no aporta nada a la reconstrucción más que información redundante.

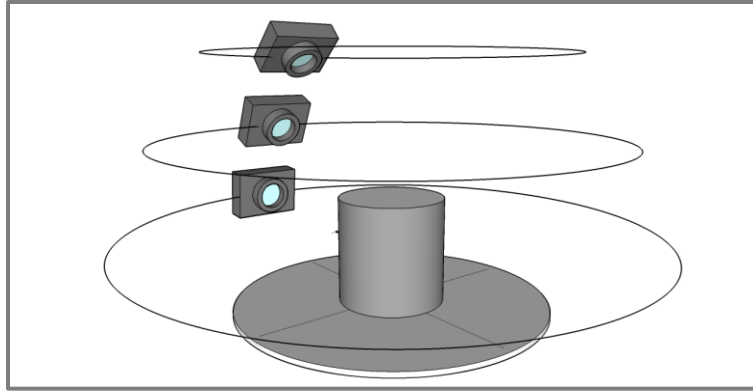


Ilustración 10 - Captura multi-orbital

El modelo de trayectoria anteriormente planteado permite establecer una geometría de captura fija que consiste en un sistema hemisférico centrado en el eje de desplazamiento de la cámara con respecto al objeto. Dicho sistema de referencia describe la posición relativa del sensor de la cámara con respecto al objeto logrando así simplificar el posicionamiento de la misma mediante sistemas electromecánicos.

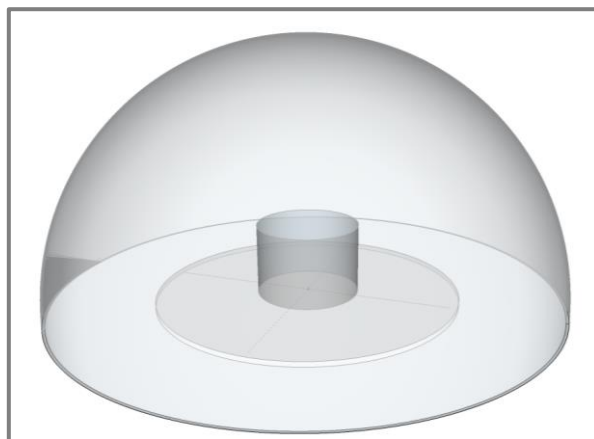


Ilustración 11 - Geometría del proceso de captura

Con el propósito de establecer este sistema de referencia se ha decidido implementar un brazo guía que permita variar la posición y el ángulo de la cámara con respecto al plano horizontal. Mediante el movimiento rotacional de este sistema se lograría abarcar la totalidad de la geometría propuesta.

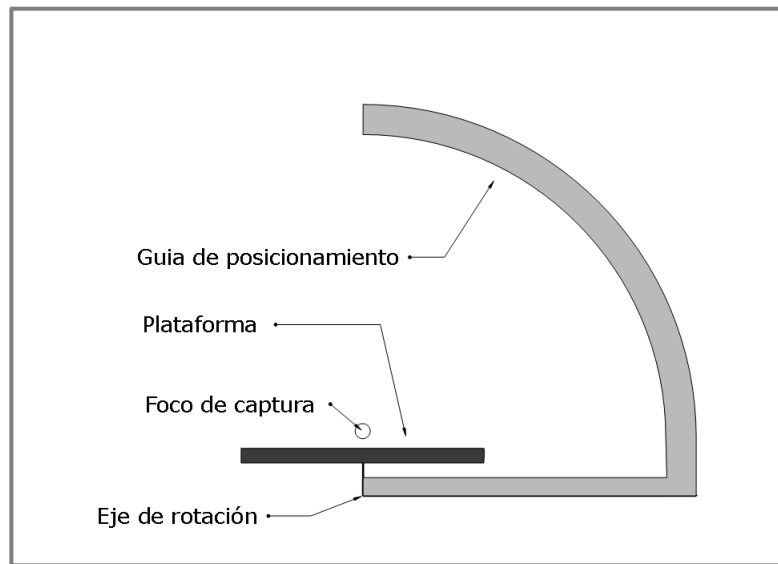


Ilustración 12 - Sistema guía-plataforma

En cuanto al movimiento rotacional, se decidió rotar la plataforma sobre la cual reposa el objeto de escaneo en lugar de rotar la guía de posicionamiento angular. Debido a como el software implementa los algoritmos de identificación de características, puntos de referencia y reconstrucción del modelo. Lo recomendable es que la guía realice el proceso de rotación, no obstante eso implicaría un aumento en la complejidad del sistema mecánico destinado a este movimiento así como un aumento de las consideraciones necesarias para que el dispositivo opere garantizando la seguridad tanto de sí mismo y del objeto de escaneo como la del usuario.

2.1.3 ADQUISICION DE DATOS

El método de adquisición de imágenes es también un punto crítico en el planteamiento de la solución. Dependiendo de las características del dispositivo de captura habrá que considerar aspectos como las dimensiones del prototipo, la potencia y robustez del sistema mecánico de posicionamiento y el sistema de control del propio dispositivo de captura.

Se evaluaron diferentes alternativas con el fin de implementar la más adecuada:

- **Cámara Web USB**

Fue la primera opción que se consideró, esto debido a su costo relativamente bajo, aun así se descartó a causa de que su calidad de imagen tiende a ser baja debido a que están diseñadas para transmitir video a tasas de bits no muy altas eso sumado a relaciones señal ruido típicamente bajas.

- **Módulo de cámara Raspberry Pi**

Raspberry pi ofrece una alternativa interesante que fue examinada más a fondo. Su módulo de cámara, por un coste aproximado de 25 dólares ofrece una resolución de 8 Megapíxeles y una calidad de imagen decente, la principal desventaja es que tiene una distancia mínima de enfoque de 1 metro, lo que obligaría a establecer la distancia entre la guía y la plataforma

a una distancia similar que además de aumentar el tamaño final del prototipo provoca un incremento en la longitud del plano de las tomas y en consecuencia perdida de detalle debido a la reducción del número de pixeles ocupados por el objeto.

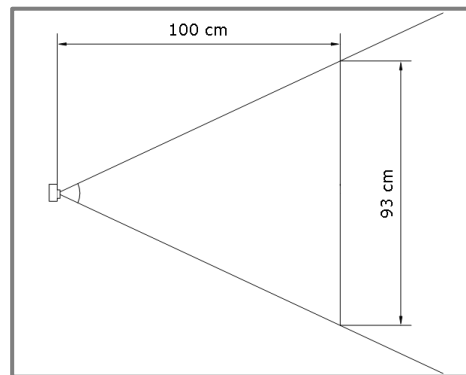


Ilustración 13 - Campo de visión de la Picamera a un metro

- **Cámara Digital Réflex**

La alternativa más viable aunque mucho más costosa fue usar una cámara digital semiprofesional. Entre las ventajas de implementar una cámara DSLR con respecto a las anteriores alternativas encontramos:

- Mayor relación S/N (Señal/Ruido)
- Menor distancia mínima de enfoque (28cm con un objetivo de 18-55mm)
- Mayor resolución así como un sensor de mayor tamaño
- Permite control y carga de las capturas de forma remota

Lo anterior se traduce en una mayor cantidad y calidad de los datos adquiridos, así como una reducción en los tiempos de trabajo.

2.1.4 DELIMITACION DE DIMENSIONES

Una vez planteada la geometría y el medio de adquisición de imágenes se pueden definir las dimensiones generales del prototipo así como también delimitar el tamaño de los objetos que se puedan digitalizar adecuadamente por el dispositivo.

Primero que todo se establece un valor tentativo de 50 cm para la distancia entre la guía de posicionamiento angular y el punto central o foco de captura, este valor no se escogió por ningún motivo en particular más que delimitar el tamaño del dispositivo y el de los objetos a digitalizar.

Teniendo en cuenta que la guía describe un arco circular, es decir que toda su cara interna se encuentra equidistante del foco de captura y una cámara DSLR con un objetivo básico tiene una distancia de enfoque de alrededor de 28 cm se puede determinar efectiva de captura y por consiguiente las dimensiones que necesita un objeto para ser digitalizado adecuadamente, para este caso el área de captura sería descrita por un casquete esférico de 22 centímetros de radio.

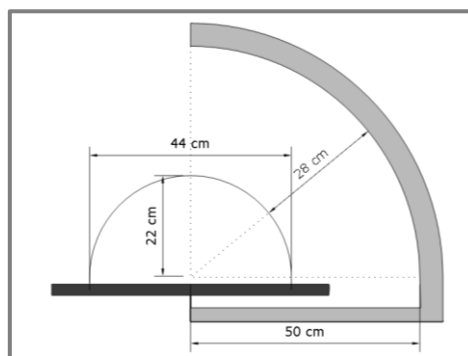


Ilustración 14 - Dimensiones generales del prototipo

2.1.5 ADECUACION DE LA ESCENA

Hay que poner en consideración una serie de factores que pueden afectar el proceso de captura y de reconstrucción del modelo tridimensional, estos en su mayoría pueden controlarse realizando adecuaciones en la escena de captura, a continuación se describen dichos factores y la forma en la que se puede controlarlos:

- **Iluminación inconsistente o deficiente:** Debido a que el prototipo realiza las capturas haciendo rotar la pieza y no la cámara, condiciones de iluminación inadecuadas pueden provocar errores o falta de calidad en la reconstrucción de los modelos. Para minimizar este tipo de situaciones no es suficiente con usar flash o iluminar directamente el objeto con otros métodos, puede ser necesario usar difusores de luz a fin de minimizar la generación de sombras indeseadas.
- **Superficies complejas:** Al digitalizar objetos con superficies complejas o con depresiones severas es posible que se generen anomalías en el modelo reconstruido, esto se solucionó aumentando la resolución de capturas, es decir, incrementando el número de fotografías por revolución y el número de orbitas intermedias con el fin de aportar un mayor número de transformaciones que el software pudiera contrastar.

- **Puntos de referencia indeseados:** debido a como el software realiza el proceso de reconstrucción toma referencias de todo el contenido de las imágenes y al no estar rotando la cámara sino la pieza el fondo será el mismo para todas, lo que acarrearía un posicionamiento incorrecto de las tomas dentro de la reconstrucción hecha por el software, esto se solucionó aislando la escena de características reconocibles por los algoritmos de visión artificial, en otras palabras remplazando el fondo fijo por una superficie uniforme.
- **Puntos de referencia escasos:** En caso donde el objeto a digitalizar posee una superficie muy uniforme es posible que debido al aislamiento de la escena no se pueda reconstruir el modelo, por lo que se colocó patrón guía en la base del objeto a digitalizar.



Ilustración 15 - Captura con adecuación de escena (Se establece un fondo en color sólido y se coloca un patrón guía en la base)

2.2 DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

Una vez establecidos los principios de operación del prototipo, se estructuro su desarrollo en dos etapas, la etapa de diseño del sistema de posicionamiento cámara-objeto y la de diseño del sistema de control. La primera establece los mecanismos que permitirán posicionar la cámara de forma que se puedan tomar fotografías cumpliendo con la geometría de captura establecida, mientras que la segunda establece el método de control de dichos mecanismos y del proceso de captura en general.

2.2.1 SISTEMA DE POCISIONAMIENTO

Se estableció un sistema de plataforma rotativa y guía semicircular. El desarrollo de la plataforma giratoria no fue especialmente complejo, sin embargo posicionar la cámara a lo largo de una guía curva significo un reto mayor. Al final se optó por un sistema de transmisión basado en engranajes para ambos mecanismos. Siendo impulsada la plataforma rotativa por un motor paso a paso, mientras que la guía semicircular al requerir un control de posición más complejo se impulsó por medio de un motor DC convencional con un reductor mecánico y control de posición retroalimentado.

2.2.1.1 Plataforma rotativa

Las plataforma se diseñó teniendo en cuenta una serie de consideraciones, el mecanismo debe ser capaz de realizar incrementos de por lo menos 10° en cualquier dirección y es necesario poder controlar la

aceleración de la plataforma de modo que no haya riesgo de que las piezas a digitalizar se muevan o se caigan. Con el fin de cumplir con estos requisitos se implementó un motor paso a paso bipolar en formato NEMA 17. Para reducir la carga mecánica del motor la plataforma se apoya sobre un rodamiento axial y el movimiento se transmite mediante un sistema de engranajes con una relación de transmisión de 4 a 1.

Tabla 2 - Características motor paso a paso implementado

Dimensiones	42.3 x 42.3 x 48 mm
Peso	350 g
Diámetro del eje	5 mm
Corriente por bobina	1.2 A
Voltaje nominal	4 V
Resistencia por bobina	3.3 Ohms
Inductancia por bobina	2.8 mH
Torque estático	3.2 Kg/cm

Se usa un rodamiento para cargas axiales debido a que el peso de la pieza estará orientado paralelamente con respecto al eje de rotación de la plataforma.



Ilustración 16 - Rodamiento para carga axial

En cuanto al sistema de engranajes se elaboró una rueda dentada de 48 dientes que va fijado a la plataforma y otra de 12 dientes que se instala en el motor. Por practicidad las ruedas dentadas se diseñaron mediante la herramienta Inkscape con un paso de 10 mm por diente y fueron elaboradas en MDF de 9 mm de espesor.

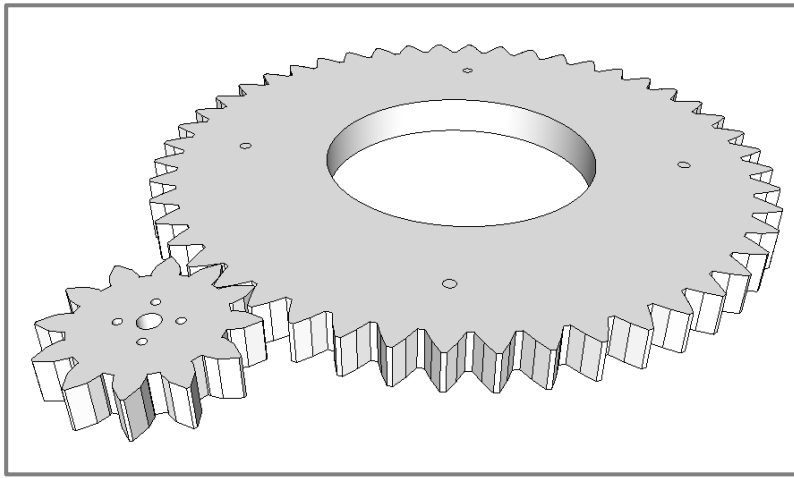


Ilustración 17 - Transmisión de la plataforma

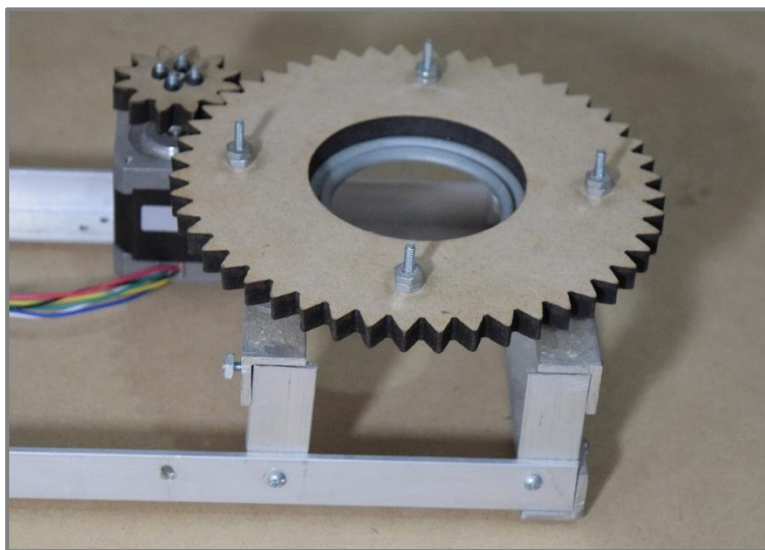


Ilustración 18 - Sistema de posicionamiento de la plataforma

2.2.1.2 Guía de posicionamiento

La ubicación angular de la cámara se modifica mediante el desplazamiento de un carro a lo largo de una guía curva. Dicha guía de desplazamiento describe un segmento de arco de 90 grados cuyo vértice se centra en el foco de captura del dispositivo.

El movimiento del carro se logra gracias a un sistema de piñón y corredera. Para impulsar este sistema se utiliza un motor de corriente continua junto con un motorreductor auto-bloqueante o no reversible, es decir que la dirección de transmisión de movimiento solo se puede dar en un sentido, desde el motor hacia el eje exterior pero no en sentido contrario. Esto con el fin de contar con un alto torque que permita mover el carro junto con la cámara y que al desenergizar el motor no sea posible que el carro se deslice libremente a lo largo de la guía.

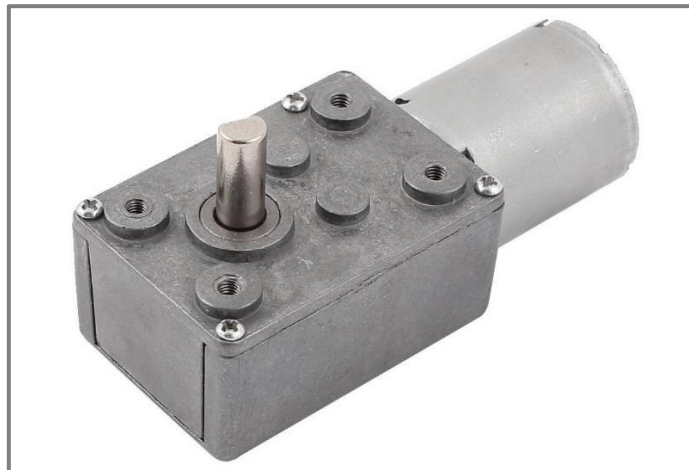


Ilustración 19 - Motor DC con motorreductor no reversible

El sistema de piñón y corredera se diseñó con una relación de transmisión de aproximadamente 7 a 1, es decir el eje del motorreductor necesita realizar 7 revoluciones para hacer todo el recorrido de la guía. El reductor usado tiene una relación de conversión de 5000 a 15 revoluciones por minuto por lo que consigue realizar todo el recorrido en aproximadamente 28 segundos.

Al igual que la plataforma el sistema de piñón y corredera se elaboró en MDF de 9 milímetros con paso entre dientes de 10 milímetros. Para fijar el carro a la guía se usa un juego de rodamientos en el extremo contrario al del contacto del piñón con la corredera, creando una sujeción por tensión mecánica con tres puntos de apoyo.

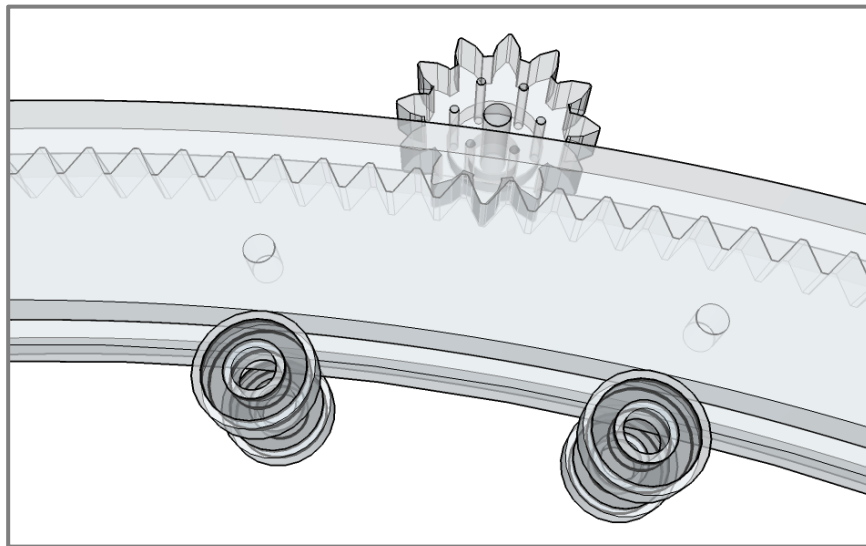


Ilustración 20 - Sistema de fijación del carro

La sujeción de la cámara al carro de posicionamiento se realiza a un costado con un tornillo de sujeción estándar de un cuarto de pulgada de manera que la cámara queda orientada verticalmente. Al estar ubicada a un costado de

la guía y no en el interior se logra aumentar la distancia eficaz de enfoque sin repercutir en las dimensiones del dispositivo. Además debido a que la geometría de adquisición de imágenes se fundamenta en una frecuencia de variación del ángulo de la pieza mayor que la del ángulo vertical de la cámara es más útil orientar esta verticalmente que en modo panorámico. Del mismo modo, para mantener centrada la escena con relación al foco de captura es necesario que el carro guía se encuentre desplazado hacia el lado opuesto al que se monta la cámara. La orientación vertical permite reducir la distancia de desplazamiento necesaria para dicha calibración así como el desbalanceo y el estrés mecánico en la estructura que una distancia mayor podría ocasionar.

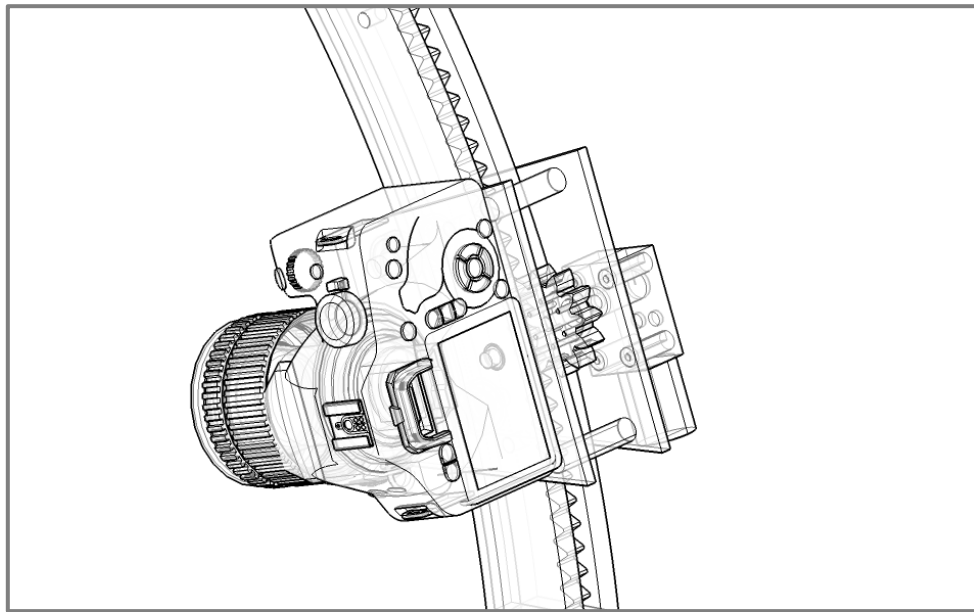


Ilustración 21 - Posicionamiento angular de la cámara

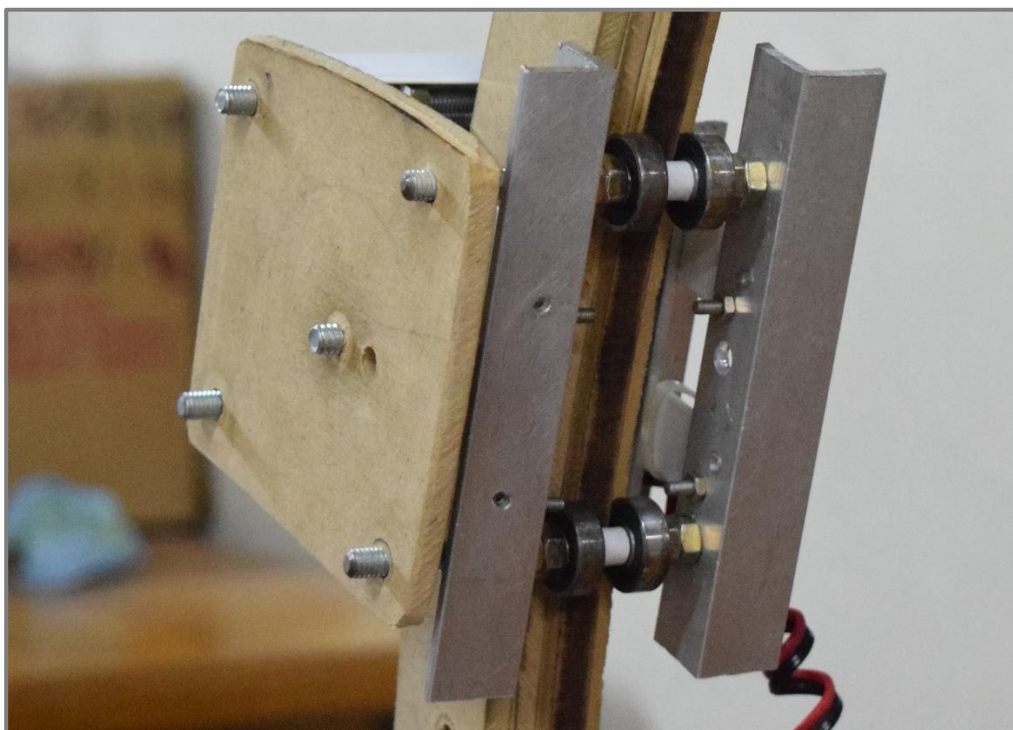


Ilustración 22 - Carro de posicionamiento

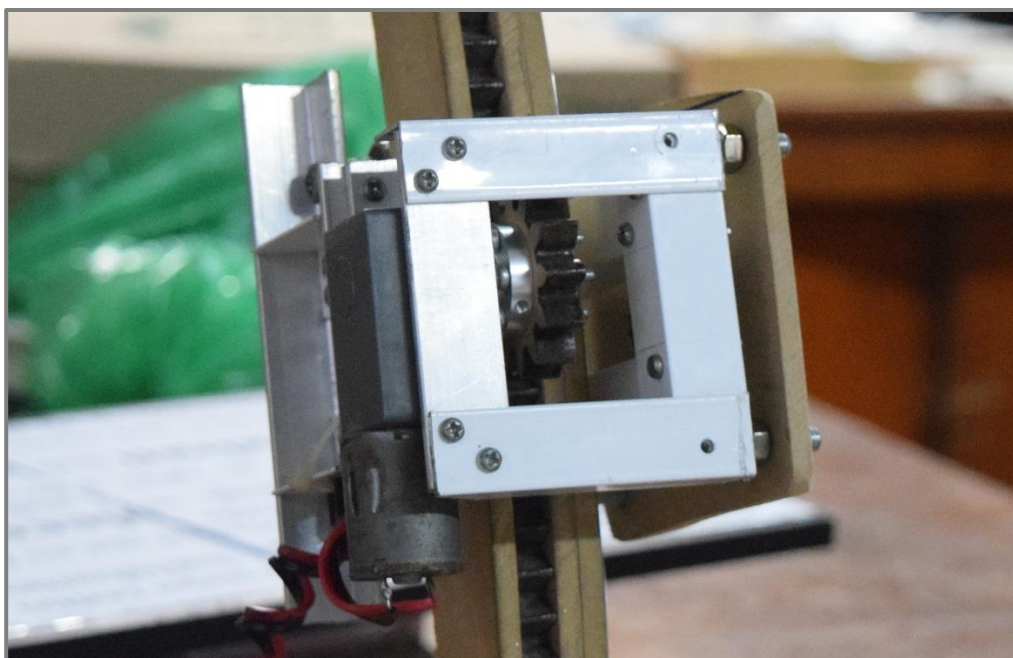


Ilustración 23 - Carro de posicionamiento (vista posterior)



Ilustración 24 - Estructura del dispositivo (vista lateral)

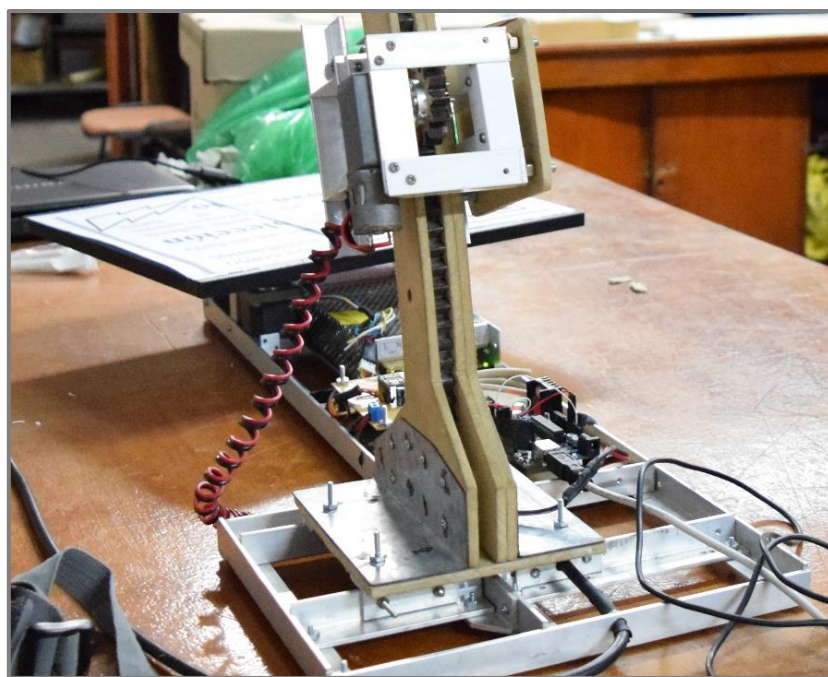


Ilustración 25 - Estructura del prototipo (vista posterior)

2.2.2 SISTEMA DE CONTROL

2.2.2.1 Plataforma

El principal objetivo a la hora de controlar la rotación de la plataforma es el de poder realizar incrementos constantes en cualquier dirección y conseguir un movimiento lo más fluido posible con una aceleración lo suficientemente baja para asegurar la integridad de las piezas. Puesto que no es necesario un control exacto de la posición de la plataforma y el motor paso a paso permite incrementos bastante precisos es posible implementar un sistema de control a lazo abierto. Partiendo de esa consideración y teniendo en cuenta los requerimientos de potencia del motor seleccionado, se implementó el controlador DRV8825 el cual permite manejar fácilmente el movimiento del motor así como su dirección de giro sin la necesidad de definir subrutinas de secuencias para cada terminal del motor.

Tabla 3 - Características del controlador DRV8825

Voltaje de operación (min.)	8.2 V – 45 V
Corriente constante por fase	1.5 A
Corriente por fase (máx.)	2.2 A
Voltaje lógico	2.5 V – 5.25 V
Resolución de microstepping	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 y 1/32

Gracias a que el controlador permite usar un multiplicador de pasos (Microstepping) se puede conseguir un movimiento más fluido, silencioso y con menos vibración a costa de pérdida de torque, para este caso se usó un multiplicador de 32 obteniéndose así un total de 6400 pasos por revolución y de aproximadamente 18 micro-pasos por grado de rotación del eje del motor. Como la relación de transmisión del motor a la plataforma es de 4 a 1 la cantidad de incrementos para que la plataforma realice una vuelta es la misma que el motor pero multiplicada por dicho factor.

Tabla 4 - Incrementos según el multiplicador de paso

	Microstepping x 1	Microstepping x1/32
pasos por revolución (Motor)	200	6400
pasos por revolución (Plataforma)	800	25600
Incremento mínimo motor (°)	1.8	0.05625
Incremento mínimo plataforma (°)	0.45	0.01406

Se debe recordar que a pesar de que los incrementos mínimos pueden llegar a ser muy pequeños lo más adecuado es establecer incrementos rotacionales de la pieza en múltiplos de la resolución original, es decir 1.8° para el motor o 0.45° para la plataforma, con el objetivo de maximizar el torque de cada incremento. De lo contrario la plataforma puede seguir desplazándose de la posición deseada hasta lograr el torque de mantenimiento suficiente. Esto puede llegar a ser más notorio en piezas con un elevado peso.

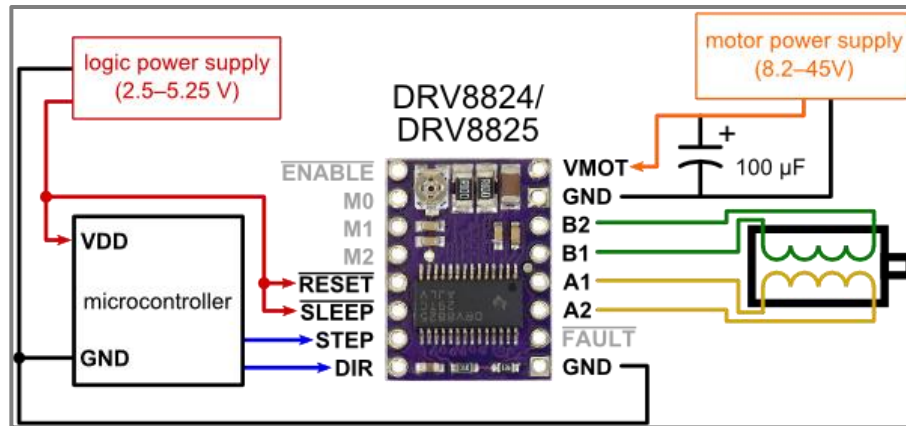


Ilustración 26 - Diagrama de conexión del DRV8825 [10]

El DRV8825 permite modificar el multiplicador de microstepping a través de tres pines etiquetados como *M0*, *M1* Y *M2*. Es posible desenergizar el motor y desactivar el controlador con un nivel de tensión bajo el pin *SLEEP* el cual por defecto deberá permanecer en alto para que el controlador funcione. Se puede controlar la dirección de giro del motor con el pin *DIR* así como también los pasos del mismo mediante una señal digital en el pin *STEP*. Cada pulso enviado genera un paso del motor sin importar el multiplicador que se haya establecido.

Tabla 5 - Configuración del multiplicador de microstepping [11]

M0	M1	M2	Resolución de Microstepping
Bajo	Bajo	Bajo	1
Alto	Bajo	Bajo	1/2
Bajo	Alto	Bajo	1/4
Alto	Alto	Bajo	1/8
Bajo	Bajo	Alto	1/16
Alto	Bajo	Alto	1/32

Una vez escogido el multiplicador solo resta establecer la distancia angular entre los incrementos rotacionales de la plataforma. El valor escogido fue 4.5° ya que permite un total de 80 segmentos a lo largo de los 360 grados de rotación de la plataforma. Según el modo de operación del dispositivo se implementaran múltiplos de este valor como incrementos para el posicionamiento de la pieza.

Para un incremento de 4.5° en la posición de la plataforma es necesario que el motor realice 10 pasos de 1.8° , con un multiplicador de $1/32$ esto se convierte en 320 pasos para esa misma distancia. Estableciendo un periodo de 1 milisegundo para este tren de pulsos se puede conocer la velocidad de rotación tanto del motor como de la plataforma.

Los periodos de rotación del motor y de la plataforma son respectivamente:

$$T_M = 1 \frac{ms}{paso} * 6400 \frac{paso}{revolucion} = 6.4 \frac{segundos}{revolucion}$$

$$T_P = 1 \frac{ms}{paso} * 25600 \frac{paso}{revolucion} = 25.6 \frac{segundos}{revolucion}$$

Se sabe entonces que al motor y a la plataforma les toma 6.4 y 25.6 segundos respectivamente realizar una vuelta completa sobre sus respectivos ejes. Al expresarlo en velocidad angular se obtiene:

$$w_M = \frac{2\pi}{T_M} = 0.98 \frac{radianes}{seg} = 56.15^\circ /seg$$

$$w_P = \frac{2\pi}{T_P} = 0.24 \frac{radianes}{seg} = 14.06^\circ /seg$$

Tabla 6 - Incrementos rotacionales de la plataforma.

Incremento	Incrementos por revolución	Numero de pasos
4.5°	80	320
9°	40	640
18°	20	1280
36°	10	2560

2.2.2.2 Guía de posicionamiento

A pesar de que la geometría de captura no exige una exactitud elevada en el posicionamiento angular de la cámara, es necesario controlar la ubicación relativa del carro a lo largo del riel con el fin de evitar sobreesfuerzos del motor al llegar a los extremos de la guía. Es posible eliminar este inconveniente mediante un sistema de control On/Off con un par de interruptores de final de carrera sin embargo aplicar un sistema de control a lazo cerrado permitiría además un control básico de la posición del carro.

Para lograr el lazo de realimentación se acopló un potenciómetro a la rueda dentada del carro de posicionamiento, de este modo al introducir una tensión conocida en los extremos del potenciómetro funcionaría como transductor indicando una tensión proporcional a la posición del carro. Debido a que el motor realiza 7 revoluciones para recorrer la totalidad de la guía fue necesario usar un potenciómetro lineal de 10 vueltas.



Ilustración 27 - Potenciómetro lineal de 10 vueltas

Si se introduce una tensión de 5 voltios en los extremos del potenciómetro el incremento por vuelta será de 500 milivoltios. El rango eficaz está determinado por el número máximo de vueltas que realiza el piñón a lo largo de la guía, contemplando esto y que la guía cubre un arco de 90° se puede establecer la relación entre la tensión en el terminal central del potenciómetro con respecto a la posición angular del carro.

$$Rango = 7 * 500mv = 3.5 \text{ voltios}$$

$$V_{pot} = \frac{3.5 V}{90^\circ} = 0.038 V/^\circ = 38 mV/^\circ$$

Se estableció como incremento mínimo de la posición del carro una variación de 5° y un rango de desplazamiento máximo del carro de 85° por lo que se consiguen un total de 18 posiciones posibles de la cámara a lo largo de la guía.

Tabla 7 - Tensión de referencia por posición de la cámara

Posición (grados °)	Tensión Objetivo (mV)	Posición (grados °)	Tensión Objetivo (mV)
0	0	45	1710
5	190	50	1900
10	380	55	2090
15	570	60	2280
20	760	65	2470
25	950	70	2660
30	1140	75	2850
35	1330	80	3040
40	1520	85	3230

Definido el método de retroalimentación del sistema de control y los valores de referencia discretos queda por definir la acción de control sobre el sistema. Debido a que se necesita mantener la cámara estable en una posición y que el desplazamiento del carro a lo largo de la guía es un movimiento relativamente lento, se descartó la implementación de un controlador PID debido a que este actúa frente a variaciones rápidas e imprevistas de la salida del sistema. Se optó entonces por un modelo de control más básico con una ganancia muy alta, es decir, ante una variación de la referencia el motor avanzara o retrocederá a plena potencia, para evitar oscilaciones se establece un intervalo de tolerancia para el error de 10mV en lugar de un valor puntual de 0 mV. El control final del motor se lleva a cabo mediante un puente H L298N y una fuente de tensión de 12 V.

Tabla 8 - Características del L298N

Tensión de trabajo	46 V
Tension lógica	4.5 - 7 V
Corriente en operación continua	2 A
Disipacion de potencia	25 W

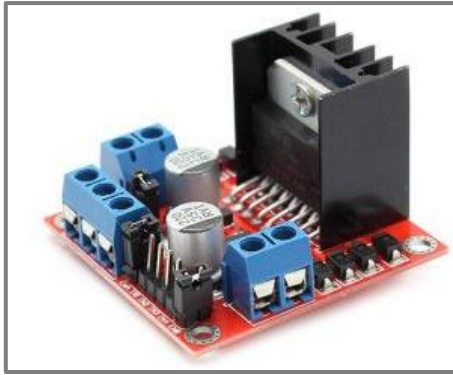


Ilustración 28 - Modulo puente H L298N

2.2.2.3 Captura fotográfica

Para el control de la cámara digital se hizo uso de la aplicación para escritorio DigicamControl, la cual es de código abierto e incorpora funciones de comunicación serial que permiten trabajar con cualquier microcontrolador sin software intermedio. Por lo que configurando adecuadamente el software es posible controlar la cámara desde el microcontrolador.

Al realizar las fotografías de manera remota es posible guardar directamente las fotografías en el disco duro de la computadora y ahorrarse el proceso de transferirlas desde la memoria de la cámara. Con la posibilidad de cargar más rápidamente las fotos al software de reconstrucción se incrementa la eficacia general del proceso. Otro beneficio de la captura remota es la facilidad de controlar la mayoría de configuraciones de la cámara y de observar al instante el resultado de cada captura.

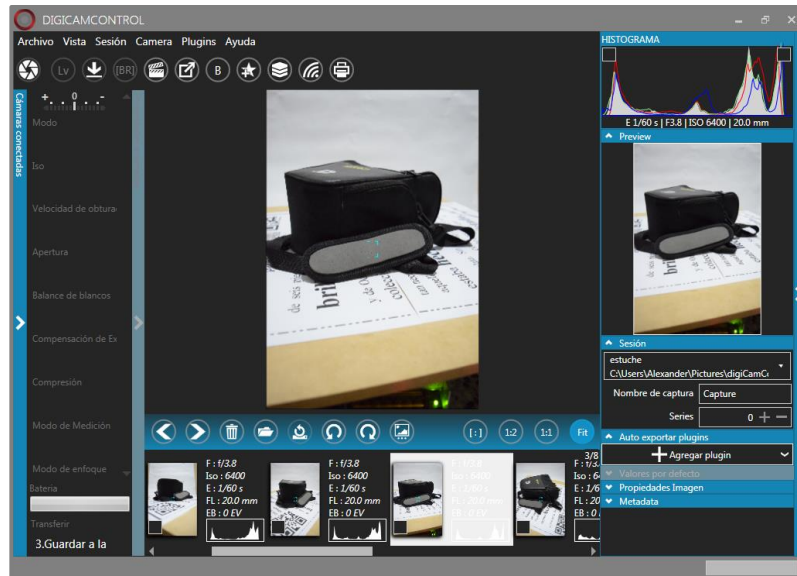


Ilustración 29 - Interfaz del software DigicamControl

Para la comunicación con el microcontrolador se emplea una conexión USB, mientras que para controlar la cámara DigicamControl requiere una conexión USB o WiFi si la cámara cuenta con este tipo de conectividad. Es compatible con multitud de modelos y prácticamente no requiere configuración posterior a su instalación.

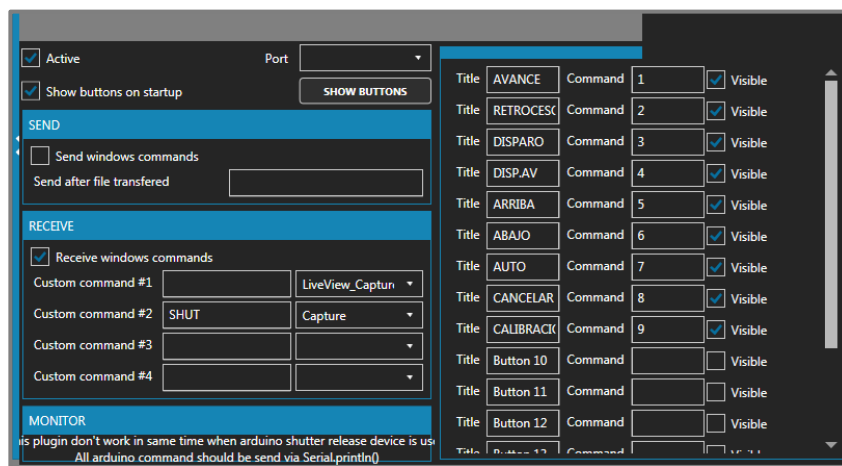


Ilustración 30 - Interfaz de configuración de la comunicación serial

2.2.2.4 Dispositivo de control

Como dispositivo de control se empleó un la tarjeta de desarrollo Arduino Uno, el principal motivo de su elección fue su practicidad y versatilidad, sin embargo cualquier microcontrolador puede cumplir con la misma tarea sin mayores cambios en el diseño del prototipo. Para el control del prototipo se hace uso de 1 entrada analógica, 5 salidas digitales y los pines de recepción y transmisión serial. En total se usan 8 terminales para la interacción con los subsistemas del dispositivo.

Tabla 9 - interfaces usadas de la tarjeta Arduino Uno

Pin	Modo	Función
1	Salida digital	Transmisión serial
0	Entrada digital	Recepción serial
13	Salida digital	Control de avance de la plataforma
12	Salida digital	Dirección de avance de la plataforma
4	Salida digital	Reposo de servomotor
11	Salida digital	Acenso de la cámara
10	Salida digital	Descenso de la cámara
A3	Entrada analógica	Lectura del transductor de posición de la cámara

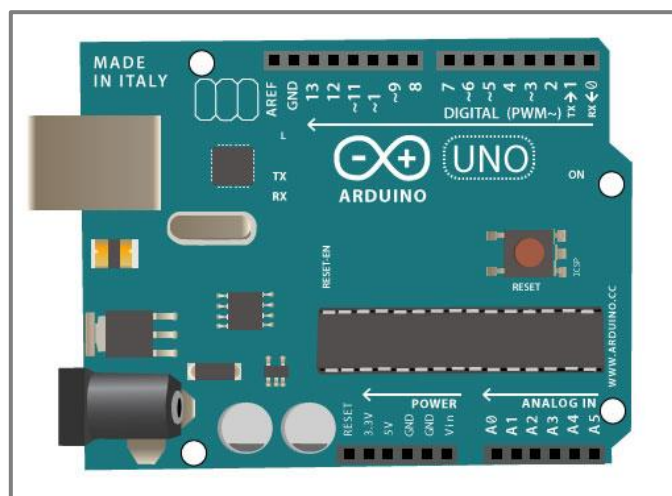


Ilustración 31 - Placa de desarrollo electrónico Arduino Uno

2.2.2.5 Interfaz y modos de operación

El usuario interactúa con el dispositivo directamente desde el software DigicamControl mediante una botonera persistente configurada exclusivamente para el prototipo, que presenta de manera sencilla los principales comandos de operación del sistema de captura. La comunicación serial entre el programa y la tarjeta Arduino es totalmente transparente al usuario, por lo que este se puede concentrar en manejar la interfaz gráfica establecida.

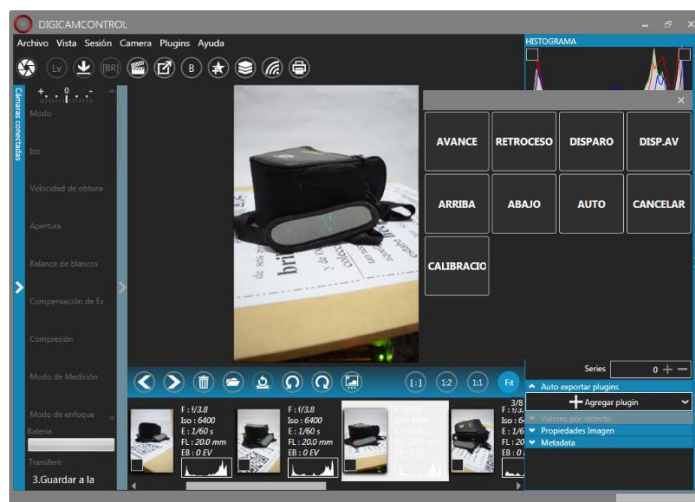


Ilustración 32 - Interfaz de captura



Ilustración 33 - Botonera de comandos configurada exclusivamente para el prototipo

Al final del desarrollo la botonera contaba con 8 comandos. Cada botón de la nombrada interfaz tiene una función claramente definida, explicadas a continuación:

- **Avance:** Se acciona la subrutina de incremento rotacional de la plataforma con un valor de 9° en dirección horaria.
- **Retroceso:** Se acciona la subrutina de incremento rotacional de la plataforma con un valor de 9° en dirección anti-horaria.
- **Disparo:** Enfoca y dispara la cámara en la posición actual del sistema cámara-pieza
- **Disp.Av:** Enfoca y dispara la cámara en la posición actual, luego incrementa la posición de la plataforma en 18°
- **Arriba:** Incrementa el ángulo de la cámara con respecto a la plataforma en 5°
- **Abajo:** reduce el ángulo de la cámara con respecto a la plataforma en 5°
- **Auto:** Realiza automáticamente tomas a lo largo de 3 orbitas de 10° , 40° y 70° respectivamente, con un incremento rotacional de 18° para un total de 60 capturas que resultaron ser un numero óptimo para la obtención de modelos con una buena calidad.

Se puede observar que mediante esta interfaz se pueden realizar capturas automáticas con un solo botón o si se desea una mayor resolución de capturas se pueden hacer capturas independientes desde la perspectiva que se desee profundizar.



Ilustración 34 - Prototipo terminado

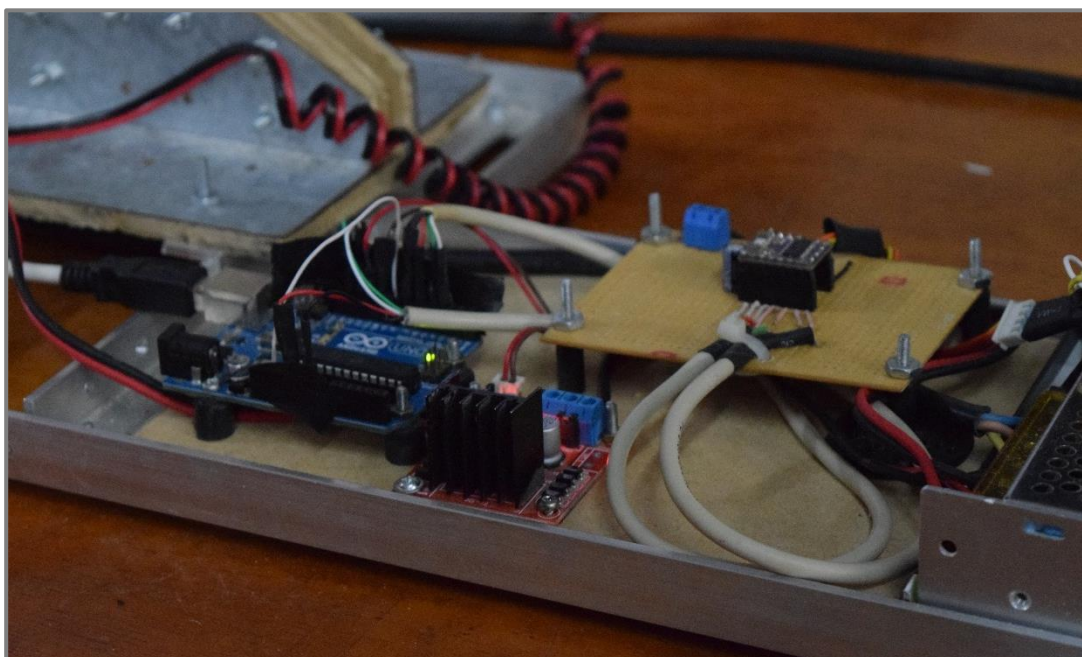


Ilustración 35 - Sistema de control del prototipo



Ilustración 36 - Prototipo en funcionamiento (vista lateral)



Ilustración 37 - Prototipo en funcionamiento (vista posterior)

3 RESULTADOS

Es necesario corroborar el correcto funcionamiento de los sistemas antes diseñados, para lo cual se hace necesario realizar pruebas de funcionamiento general del dispositivo. Se verifica que se realicen las capturas de acuerdo a como se plantearon en etapas preliminares y que estas permitan generar modelos tridimensionales adecuados. En términos generales el proceso de captura debe resultar más sencillo y eficiente que sin la ayuda del dispositivo ya que el principal indicador de éxito de este proyecto de automatización es lograr simplificar y agilizar el proceso de captura con respecto a su alternativa manual.

Se realizaron pruebas preliminares con 3 objetos que por sus características físicas ponían a prueba tanto el funcionamiento del dispositivo como de los software de reconstrucción. Para cada uno se realizaron 3 iteraciones del proceso en el modo de operación automático con el fin de constatar la consistencia de la operación del prototipo y de los resultados obtenidos.



Ilustración 38 - Prueba de funcionamiento del prototipo

3.1 PRUEBAS PRELIMINARES

3.1.1 ADQUISICION DE IMAGENES

Para la primera prueba se realizaron capturas a un mando de Xbox ya que su superficie sinuosa ponía a prueba la validez de la geometría de captura definida y la reconstrucción hecha por el software. Se utilizaron incrementos de 20 grados en la orientación de la pieza y tres orbitas desfasadas en 30 grados. El resultado fue la obtención de 54 tomas del objeto, por practicidad se documentan incrementos de 60°.

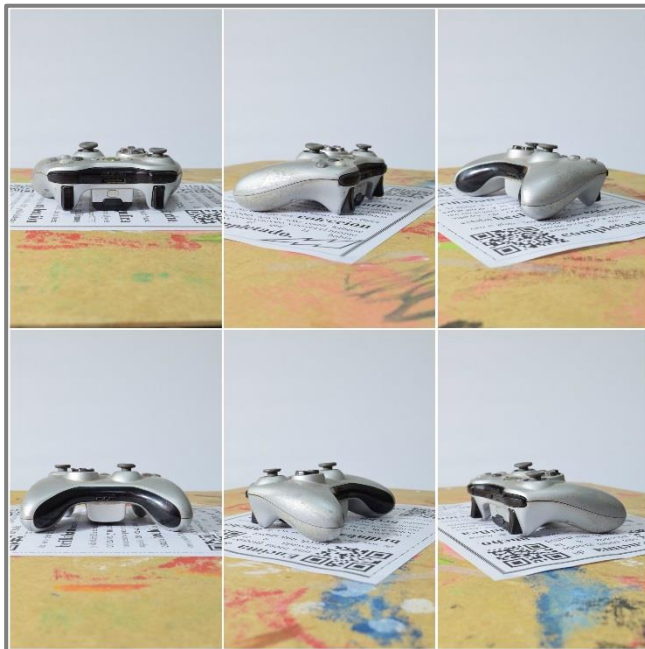


Ilustración 39 - Capturas de mando a 10° con incrementos rotacionales de 60°



Ilustración 40 - Capturas de mando a 40° con incrementos rotacionales de 60°



Ilustración 41 - Capturas de mando a 70° con incrementos rotacionales de 60°

La segunda prueba se realizó con un adorno de porcelana con una superficie brillante, los desarrolladores de las aplicaciones de reconstrucción no aconsejan usar este método con este tipo de superficies, y en general ningún tipo de técnica que se fundamente en principios ópticos, sin embargo se escogió este objeto para precisamente poner a prueba el rendimiento de cada software bajo condiciones desfavorables.



Ilustración 42 - Capturas de frutero a 10° con incrementos rotacionales de 60°



Ilustración 43 - Capturas de frutero a 40° con incrementos rotacionales de 60°



Ilustración 44 - Capturas de frutero a 70° con incrementos rotacionales de 60°

Por último se incrementó la dificultad de la digitalización usando una taza con un acabado brillante y además de color blanco. Debido a que el fondo de las escenas es también blanco es probable que un objeto que no generara mucho contraste no pudiera ser digitalizado adecuadamente

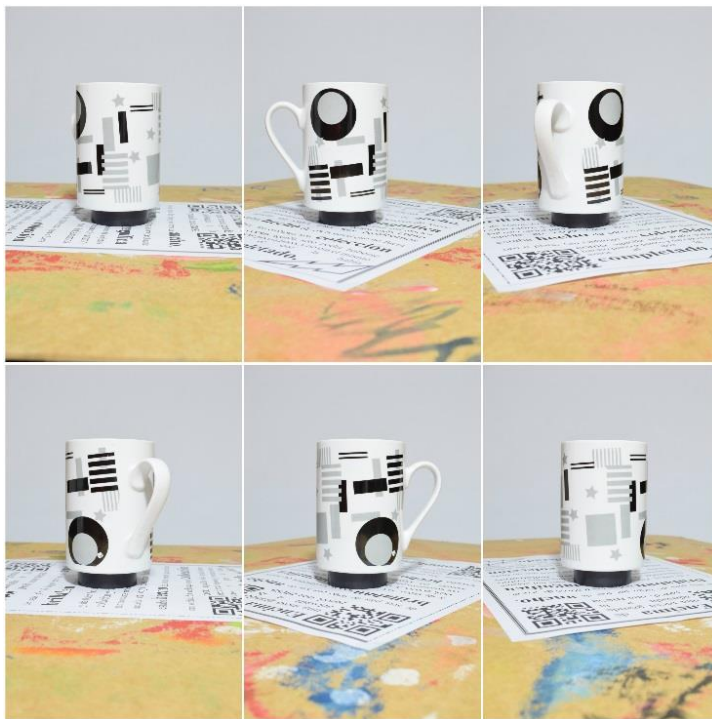


Ilustración 45 - capturas de taza a 10° con incrementos rotacionales de 60°



Ilustración 46 - capturas de taza a 40° con incrementos rotacionales de 60°



Ilustración 47 - capturas de taza a 70° con incrementos rotacionales de 60°

3.1.2 TIEMPOS DE CAPTURA

Es lógico esperar una reducción apreciable en los tiempos de captura con respecto al fotografiado manual ya que se está implementando un proyecto de automatización, de lo que no se puede tener certeza hasta que se hacen las respectivas pruebas es de la proporción de dicha mejora.

Las siguientes tablas contemplan los tiempos de adquisición de imágenes de cada una de las pruebas realizadas y las compara con pruebas de control en las que se realizaban las fotografías manualmente.

Tabla 10 - Tiempos de captura para la prueba n°1

	N° de capturas	Tiempo requerido (min)	Captura por minuto
Prueba manual	49	11,2	4,37
Prueba prototipo	54	2,33	23,17
Proporción de mejora (%)			530 %

Tabla 11 - Tiempos de captura para la prueba n°2

	N° de capturas	Tiempo requerido (min)	Captura por minuto
Prueba manual	45	10,1	4,45
Prueba prototipo	54	2,35	22,98
Proporción de mejora (%)			516 %

Tabla 12 - Tiempos de captura para la prueba n°3

	N° de capturas	Tiempo requerido (min)	Captura por minuto
Prueba manual	46	10,9	4.22
Prueba prototipo	54	2,34	23,08
Proporción de mejora (%)			546 %

Se puede comprobar que la velocidad de captura lograda con el prototipo supera ampliamente la del proceso manual. Para cada caso se tomaron por lo menos 5 veces más fotografías, en términos generales es posible afirmar que mediante el prototipo se logra una eficiencia de más del 500 por ciento en el proceso de adquisición de datos sin contar que además de ser más demorado, el proceso manual conlleva un esfuerzo físico mucho mayor.

3.1.3 GENERACIÓN DE MODELOS

Una vez probada la eficiencia del prototipo en el proceso de adquisición de imágenes es necesario validar que el software interprete las tomas tal como se estableció anteriormente en la geometría de captura así como también evaluar la calidad de los modelos obtenidos.

3.1.3.1 Agisoft PhotoScan

El software PhotoScan posiciono adecuadamente la mayoría de las capturas, sin embargo presentó dificultades con la órbita inferior realizada con una inclinación de 10° por lo que la parte inferior del modelo resultado de la prueba n°1 presenta vacíos en las depresiones más pronunciadas de su superficie

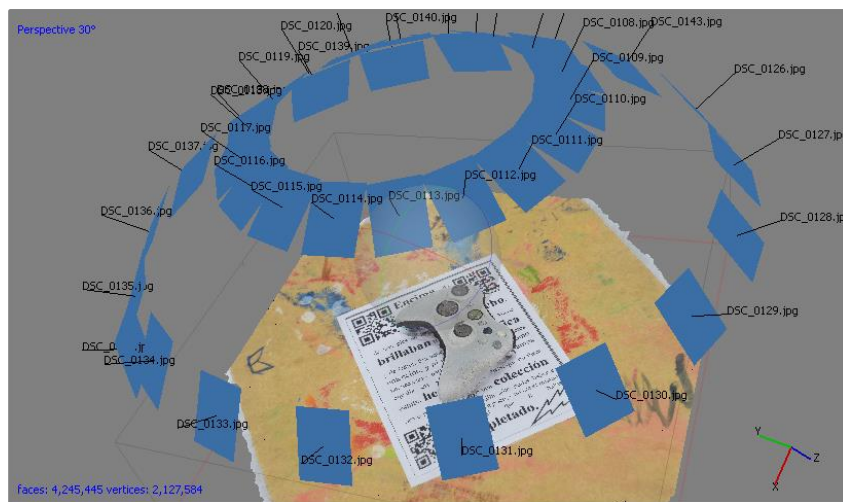


Ilustración 48 - Geometría de captura prueba n°1, Agisoft PhotoScan



Ilustración 51 - Modelo tridimensional prueba n°2, Agisoft PhotoScan

La prueba n°3 fue donde Agisoft PhotoScan tuvo problemas serios con la reconstrucción de la escena, al parecer entornos con bajo contraste no son los adecuados para sus algoritmos de reconstrucción ya que a pesar de que se reconstruyó la geometría de manera adecuada las mallas obtenidas presentan un sinnúmero de anomalías. Hasta tal punto que el modelo obtenido no se asemeja en nada al objeto real.

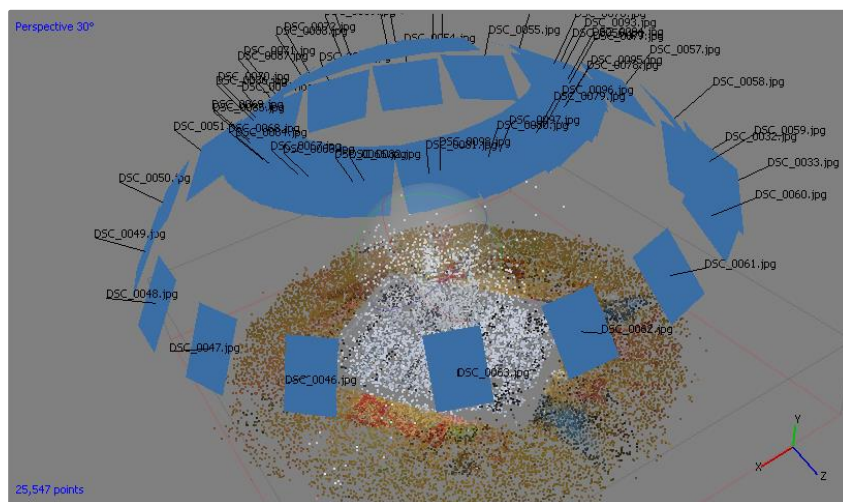


Ilustración 52 - Geometría de captura prueba n°3, Agisoft PhotoScan

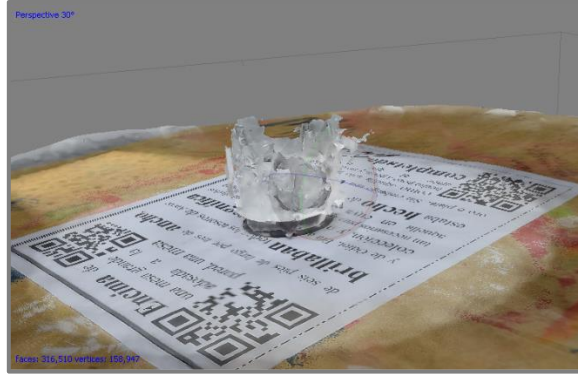


Ilustración 53 - Modelo tridimensional prueba n°3, Agisoft PhotoScan

Pese a que las fotografías fueron interpretadas de la forma en la que fue establecida la geometría de captura, el software Agisoft PhotoScan no ofreció los resultados esperados. Lo que obliga excluirlo de las alternativas de reconstrucción inicialmente contempladas.

3.1.3.2 VisualSFM

El desempeño de VisualSFM terminó por sorprender ya que a pesar de ser un software de código abierto compite muy bien con alternativas cerradas de grandes desarrolladores obteniendo muy buenos resultados. La gran mayoría de las tomas fueron ubicadas espacialmente según se esperaba y la nube de puntos densa demostró estar generada adecuadamente para cada una de las pruebas. El único inconveniente de esta aplicación es que no exporta directamente los modelos sino dicha nube de puntos, lo que obliga a generar los modelos en una aplicación externa. Una alternativa libre para este procedimiento es MeshLab, por este motivo VisualSFM no califico como el software escogido para la implementación final del dispositivo.

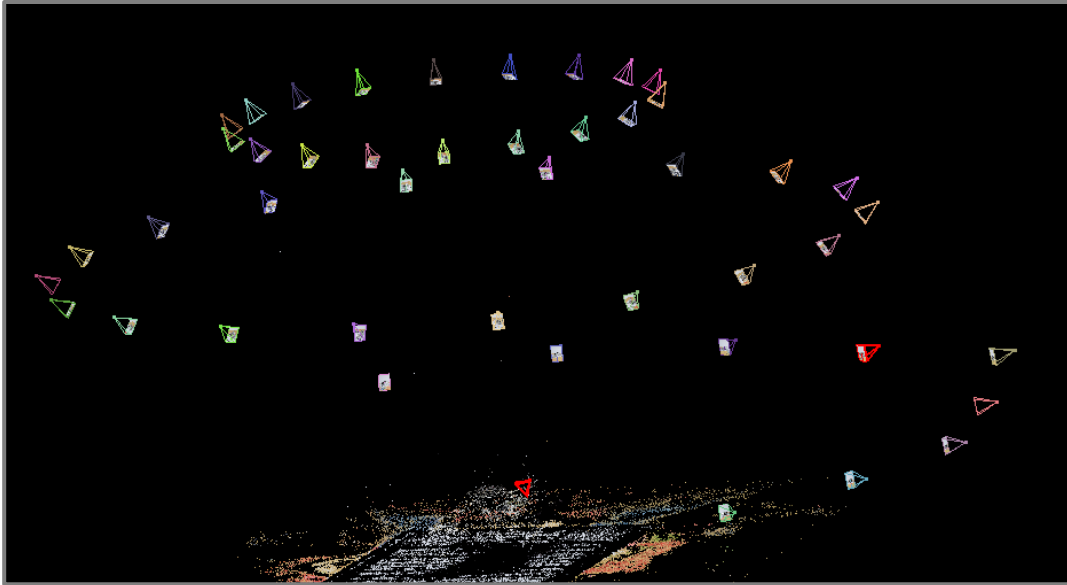


Ilustración 54 - Geometría de captura prueba n°1, VisualSFM



Ilustración 55 - Nube de puntos densa prueba n°1, VisualSFM



Ilustración 56 - Geometría de captura prueba n°2, VisualSFM



Ilustración 57 - Nube de puntos densa prueba n°2, VisualSFM



Ilustración 58 - Geometría de captura prueba n°3, VisualSFM



Ilustración 59- Nube de puntos densa prueba n°3, VisualSFM

3.1.3.3 Autodesk Remake

Remake realizó la reconstrucción de la escena de una manera excelente, posicionando adecuadamente en todas las pruebas prácticamente todas las fotografías, los modelos y mallas obtenidos resultaron de muy buena calidad. Demostró tener un muy buen desempeño en superficies y condiciones de captura desfavorables tales como superficies brillantes o escenas con bajo contraste.

Remake fue escogido como el método de reconstrucción a implementar por la calidad de los modelos obtenidos, así como la facilidad y velocidad de generación de los mismos

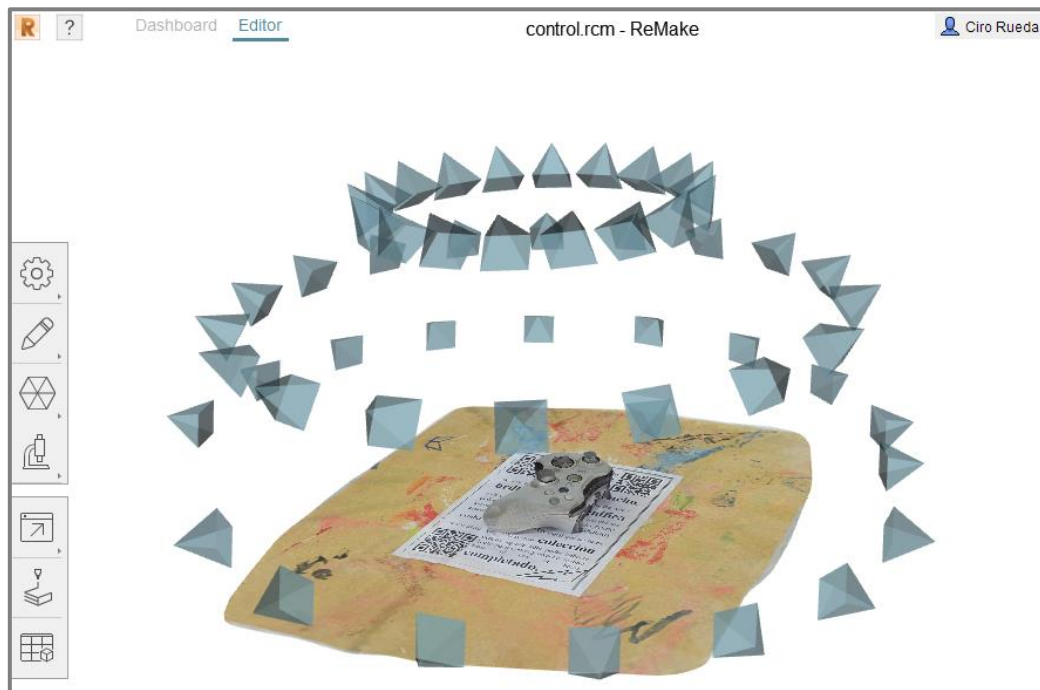


Ilustración 60 - Geometría de captura prueba n°1, Autodesk Remake



Ilustración 61 - malla tridimensional prueba n°1, Autodesk Remake



Ilustración 62 -Modelo tridimensional prueba n°1, Autodesk Remake

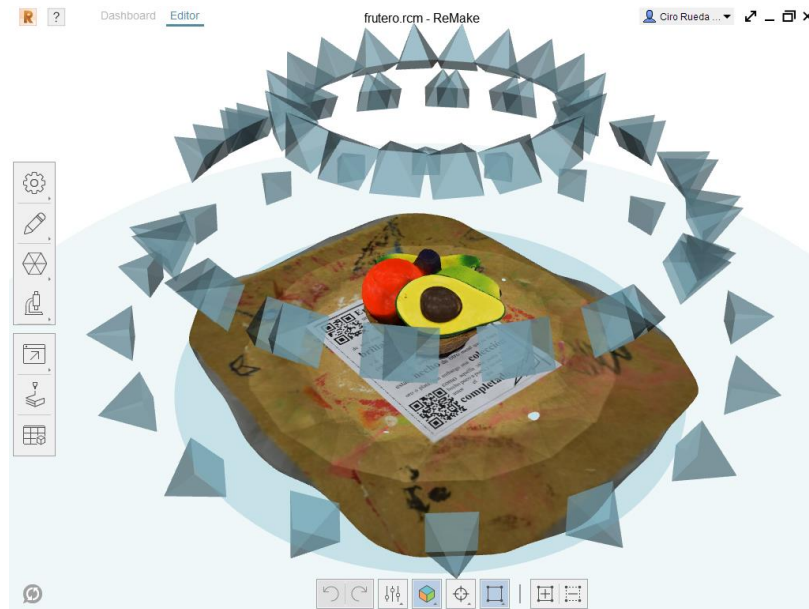


Ilustración 63 - Geometría de captura prueba n°2, Autodesk Remake

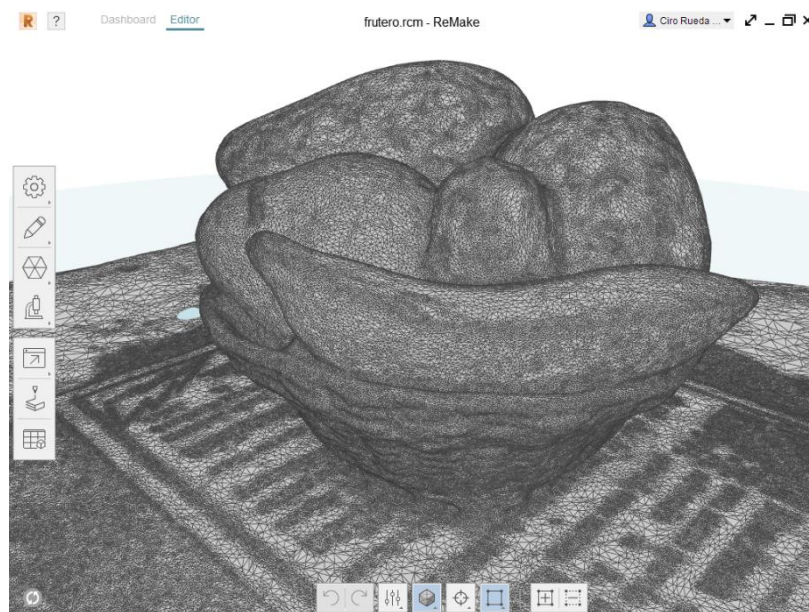


Ilustración 64 - Malla tridimensional prueba n°2, Autodesk Remake

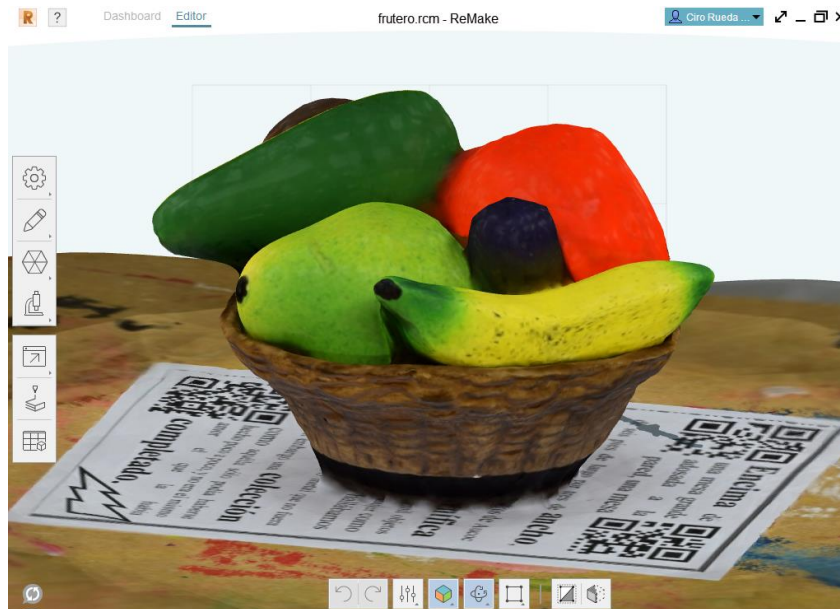


Ilustración 65 - Modelo tridimensional prueba n°2, Autodesk Remake



Ilustración 66 - Geometría de captura prueba n°3, Autodesk Remake

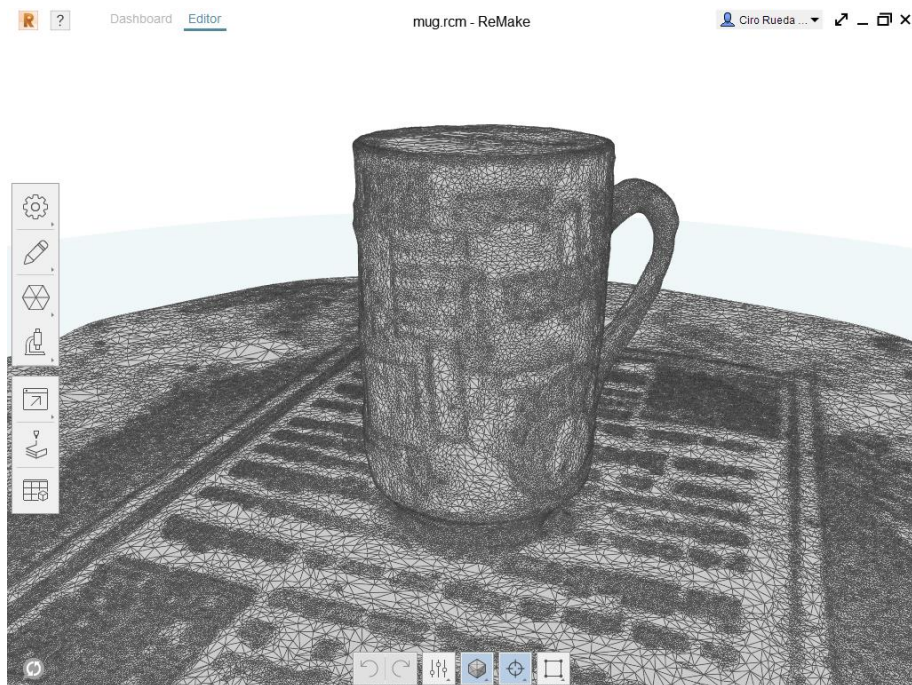


Ilustración 67 - - Mallado tridimensional prueba n°3, Autodesk Remake



Ilustración 68 - Modelo tridimensional prueba n°3, Autodesk Remake

3.2 PRUEBAS APLICADAS

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del dispositivo y su viabilidad a la hora de reconstruir los modelos se requiere hacer pruebas contextualizadas. Por lo que una vez se tuvo acceso y acompañamiento en el laboratorio de arqueología de la Universidad de Magdalena se realizaron pruebas de captura a un total de 30 piezas.

3.2.1 ADQUISICION

Para agilizar el proceso de captura por pieza se establecieron incrementos rotacionales de 36 grados y 3 orbitas desfasadas en 25 grados, lo que permite obtener 10 capturas por orbita y un total de 30 capturas por pieza, por lo que al final se contaba con 900 capturas.

Posteriormente teniendo en cuenta la calidad de los modelos obtenidos se determinó necesario para digitalizaciones futuras incrementos rotacionales más pequeños, es decir un mayor número de captura en aras de conseguir modelos con mayor resolución.

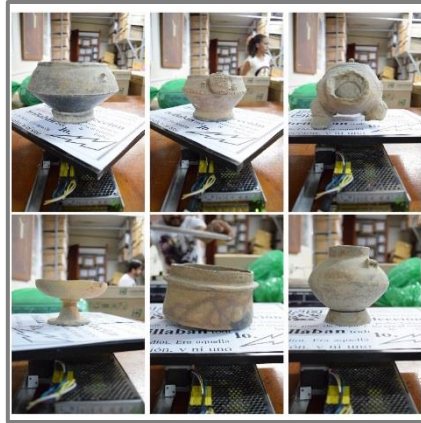


Ilustración 69 - Piezas digitalizadas (1 a 6)



Ilustración 70 - Piezas digitalizadas (7 a 12)



Ilustración 71 - Piezas digitalizadas (13 a 18)



Ilustración 72 - Piezas digitalizadas (19 a 24)



Ilustración 73 - Piezas digitalizadas (25 a 30)

3.2.2 TIEMPOS DE CAPTURA

La captura de imágenes para todas las piezas se hicieron en el modo automático a diferencia del modo asistido usado en pruebas preliminares, además se redujo la velocidad de rotación de la plataforma para garantizar la seguridad de las piezas. Por estas razones y teniendo en cuenta el protocolo de manipulación de las piezas, los tiempos de captura aumentaron con relación a las primeras pruebas, sin embargo siguen estando muy por encima de la captura manual logrando a su vez imágenes de mayor calidad.

Tabla 13 - Tiempo de captura prueba aplicada

Número de piezas	30
Tiempo total (minutos)	88
Número total de capturas	900
Capturas por minuto	10.22
Tiempo requerido por pieza (minutos)	2.93
Tiempo requerido captura manual (minutos)	9.5
Proporción de mejora conseguida	324%

3.2.3 GENERACION DE MODELOS

Dado que ya se ha validado anteriormente la generación de modelos con las imágenes obtenidas con la ayuda del prototipo, por cuestiones de practicidad se realizó la reconstrucción del modelo tridimensional de un conjunto de tres de las piezas seleccionadas. En todos los casos se obtuvo, según el Docente antropólogo Fabio Ortiz Sánchez, un modelo viable para propósitos educativos, expositivos o investigativos. Aun así es posible mejorar la calidad de estos aumentando el número de capturas que en estas pruebas fue relativamente bajo.



Ilustración 74 - Modelo 3D de jarrón con figura zoo antropomórfica

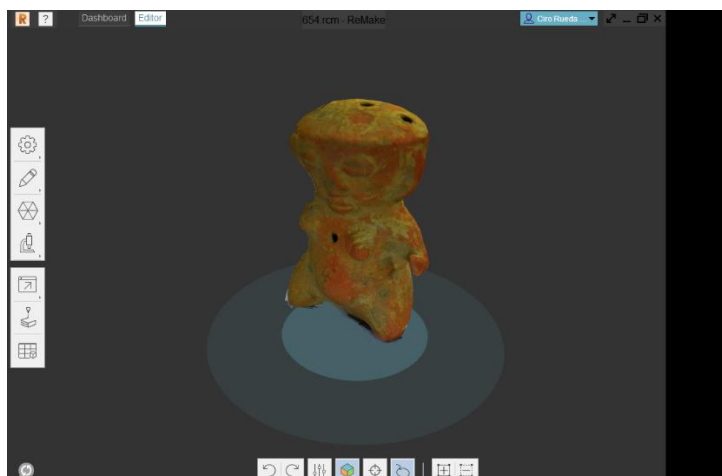


Ilustración 75 - Modelo 3D de instrumento de viento con forma antropomórfica

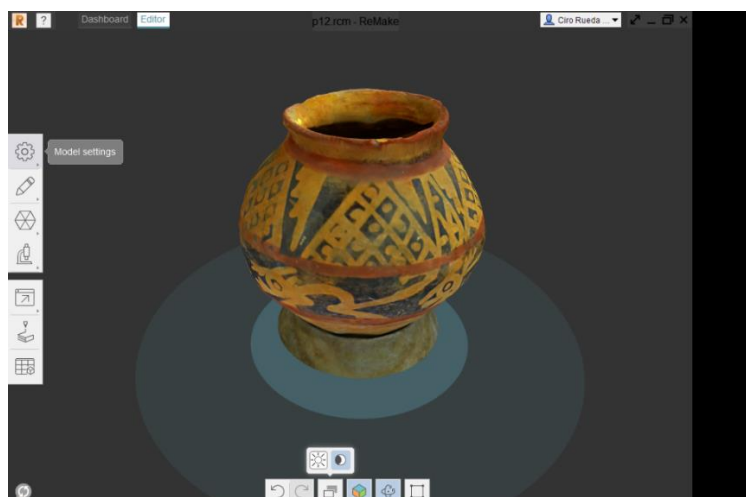


Ilustración 76 - Modelo 3D de urna cerámica

3.2.4 IMPACTO Y OPINIONES

Con la intención de documentar la opinión del programa de Antropología respecto a la viabilidad e impacto del desarrollo de este proyecto se encuestó al docente Fabio Ortiz Sánchez coordinador del laboratorio de antropología.

¿Que tan útil considera usted la reducción del tiempo requerido para la documentación fotográfica de las piezas arqueológicas? *

1 2 3 4 5

Nada útil ☐ ☐ ☐ ☐ ☒ Muy útil

¿Que tan útil le resulta la documentación tridimensional (3D) del material perteneciente al laboratorio de arqueología? *

1 2 3 4 5

Nada útil ☐ ☐ ☐ ☐ ☒ Muy útil

¿Que opina de la calidad de los modelos 3D obtenidos? *

1 2 3 4 5

Muy mala ☐ ☐ ☒ ☐ ☐ Muy buena

¿Para que propósito/s podrían ser implementados los modelos obtenidos? *

☒ Educativos

☒ de exposición

☒ Investigativos

☐ Otros:

Considera viable para el programa de antropología la implementación del prototipo. *

☒ Si

☐ No

Ilustración 77 - Encuesta realizada a la coordinación del laboratorio de antropología.

4 CONCLUSIONES

Al finalizar el desarrollo del proyecto y haber cumplido los objetivos propuestos es posible hacer algunas consideraciones:

- En todas las pruebas el prototipo actuó conforme fue diseñado, sincronizando adecuadamente los disparos de la cámara con los incrementos de rotación y altura del sistema de posicionamiento y obteniendo una buena cantidad de imágenes con muy buena calidad en poco tiempo.
- Se logró mejorar los tiempos de captura con respecto a la adquisición fotográfica manual por lo menos en un 300%.
- Se pudo determinar que el intervalo óptimo para el número de capturas necesarias para la obtención de un modelo con buena resolución es de entre 48 y 60 capturas.
- Se obtuvo un prototipo escalable, por lo que si se deseara digitalizar piezas de mayores dimensiones se podría implementar el mismo diseño con una mínima cantidad de cambios.
- Para una operación constante y a largo plazo es recomendable usar materiales más resistentes al desgaste y a la torsión mecánica.

- El diseño de un software dedicado a la reconstrucción fotogramétrica orientada a este prototipo, sería un gran tema para fundamentar un proyecto en el programa de ingeniería de sistemas. Reforzando el carácter interdisciplinar de esta iniciativa.
- Además de la generación de modelos tridimensionales el prototipo contribuye de gran manera al laboratorio de antropología aumentando la velocidad del proceso de documentación fotográfica de piezas arqueológicas.

5 PRESUPUESTO

5.1 RECURSO HUMANOS

Recursos humanos	Costo aproximado
Asesoría Director de proyecto	\$ 2.000.000 COP
Honorarios del desarrollador del proyecto	\$ 1.200.000 COP
Total	\$ 3.200.000 COP

5.2 RECURSOS INSTITUCIONALES

Recursos institucionales	Costo aproximado
Colección de piezas arqueológicas	No definido
Licencia educativa Autodesk® Remake®	Freeware
Licencia Arduino	Open Source
Licencia digiCamControl	Open Source
Computador de escritorio	\$ 3.000.000 COP
Cámara fotográfica semi-profesional	\$ 1.200.000 COP
Total	\$ 4.200.000 COP

5.3 RECURSOS ADICIONALES

Recursos adicionales	Costo aproximado
Motor paso a paso, bipolar de 200 pasos	\$ 80.000 COP
Motor DC con reductor auto-bloqueante	\$ 50.000 COP
Driver DRV8825	\$ 30.000 COP
Controlador Puente-H L298N	\$ 20.000 COP
Componentes para diseño electrónico	\$ 60.000 COP
Potencimetro multi-vuelta	\$ 20.000 COP
Placa Arduino Uno rev. 3	\$ 30.000 COP
Fuente suicheada 12V 10A 120W	\$ 60.000 COP
Insumos para estructura mecánica del prototipo	\$ 500.000 COP
Licencia VisualSFM	Open Source
Licencia SketchUp Make	Freeware
Licencia de prueba Agisoft PhotoScan	Gratuita
Total	\$ 850.000 COP

5.4 COSTO TOTAL DEL PROYECTO

Recursos humanos	\$ 3.200.000 COP
Recursos institucionales	\$ 4.200.000 COP
Recursos adicionales	\$ 850.000 COP
TOTAL	\$ 8.250.000 COP

6 REFERENCIAS

- [1] J. D. Herrera Neira y A. M. Mercado Mercado, «Desarrollo de un Software Prototipo de Aplicación para la Interacción con Imágenes de la colección arqueologica de la universidad del magdalena a partir de transformaciones geometricas,» Universidad del Magdalena, Santa Marta, 2015.
- [2] British Museum, «The British Museum,» 30 05 2014. [En línea]. Available: http://www.britishmuseum.org/whats_on/past_exhibitions/2014/ancient_lives.aspx. [Último acceso: 15 09 2015].
- [3] The British Museum, «The British Museum Blog,» 19 11 2014. [En línea]. Available: <http://blog.britishmuseum.org/2014/11/19/3d-imaging-the-assyrian-reliefs-at-the-british-museum-from-the-1850s-to-today/>. [Último acceso: 15 09 2015].
- [4] N. Stango, «Gizmodo,» 22 07 2013. [En línea]. Available: <http://gizmodo.com/amnh-3d-printing-camp-lets-make-some-dinos-868773820>. [Último acceso: 28 09 2015].
- [5] Smart3D Ltd, «KickStarter,» 2 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/1886998349/pixelio-3d-multiscanner/description>. [Último acceso: 07 2016].
- [6] J. Pereira, «DigitalHeritage,» 08 10 2012. [En línea]. Available: <http://www.jpereira.net/software-revisiones-y-consejos/introduccion-a-la-fotogrametria-parte-1>. [Último acceso: 16 09 2015].
- [7] P. E. H. D. G. S. Richard O. Duda, Pattern Classification, John Wiley & Sons, 2012.

- [8] P. R. Navarro, «La fotogrametría digital automatizada frente a los sistemas basados en sensores 3D activos,» *Revista de expresión gráfica arquitectónica*, vol. 17, nº 20, pp. 100-111, 2012.
- [9] D. W. Jones, «Control of Stepping Motors,» THE UNIVERSITY OF IOWA Department of Computer Science, 1998.
- [10] Pololu Corporation, «Pololu,» 2001. [En línea]. Available: <https://www.pololu.com/product/2133>. [Último acceso: 16 Abril 2016].
- [11] Texas Instrument, «DRV8825 Stepper Motor Controller IC,» Texas Instrument, Dallas, 2010.
- [12] V. Mazzone, «Controladores PID,» Universidad Nacional de Quilmes, Quilmes, 2002.
- [13] B. Mamer, *Film Production Technique: Creating the Accomplished Image*, Cengage Learning, 2013.
- [14] C. Wu, «VisualSFM : A Visual Structure from Motion System,» [En línea]. Available: <http://ccwu.me/vsfm/index.html>. [Último acceso: 2 08 2016].
- [15] New Japan Radio co.,Ltd, «Microstepping,» [En línea]. Available: http://www.njr.com/semicon/PDF/application_notes/Microstepping_AP_P_E.pdf. [Último acceso: 1 Mayo 2016].

7 ANEXOS
