

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHIHUAHUA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

***“MODIFICACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN
BÁSICA DE UN VEHÍCULO AÉREO
CONTROLADO REMOTAMENTE PARA LA
OBTENCIÓN DE TOPOGRAFÍAS”***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

***MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
ELECTRÓNICA***

PRESENTA:

ALAN ERUBIEL GARCÍA GUEVARA

**DIRECTOR DE LA TESIS:
*DR. MARCELINO ANGUIANO MORALES***



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**



CHIHUAHUA, CHIH., MAYO 2018

ESPACIO COPIA DEL OFICIO DE EMPASTE (IMPRESIÓN DE TESIS)

ESPACIO DE COPIA DE AUTORIZACIÓN PARA IMPRESIÓN DE TESIS

Chihuahua, Chih., 29 de mayo del 2018

Dr. Enrique Cabrero Mendoza.
Director de CONACYT.

At'n. Luis Gil Cisneros
Dirección de Formación de Científicos y Tecnólogos.

P r e s e n t e.

Por este medio me permito informar la fecha en la que he obtenido el Grado de Maestría en Ciencias de Ingeniería Electrónica en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua. Y aprovecho este medio para dedicarle mi más grato agradecimiento, por haber me otorgado la beca que me permitió dedicarme de tiempo completo a la realización de mis estudios de Posgrado y de esta manera lograr el cumplimiento del objetivo principal del convenio establecido.

Mi más profundo y cordial agradecimiento.

A t e n t a m e n t e

Ing. Alan Erubiel García Guevara
Exbecario CONACYT No 618149

c.c.p M.F. Luis Cardona Chacón
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación

PENSAMIENTO O REFLEXIÓN

Si ves que todo se torna oscuro, lucha hasta que salga el sol.
-John 117

AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto, brindándome salud y fortaleza para lograr mis objetivos.

Les doy gracias a un gran hombre que fue y será mi ejemplo de vida a seguir y sobre todo de inspiración, es una persona que me dio el libre albedrío y gracias a eso emprendí mi formación académica enfocada en los campos de la ingeniería. Nunca olvidaré su apoyo y comprensión que fueron el mayor impulso, y siempre recordaré sus sabias palabras “Que la fuerza te acompañe.”

Asimismo un reconocimiento a las personas que conforman el núcleo principal de nuestra sociedad, mi familia quienes en todo momento me acompañaron en esta etapa de la vida, brindándome su apoyo incondicional y por encima de todo, motivándome en todo momento hasta alcanzar este objetivo. Mil gracias a todas y cada una de las personas que contribuyeron para que esta meta profesional se llevara a cabo.

A mis profesores que con su increíble paciencia me brindaron su apoyo y sabiduría, enriqueciendo mis conocimientos y motivándome para generar un cambio en este mundo.

También reconozco a la Agencia Espacial Mexicana por el lanzamiento del satélite Centenario el cual marcó en mi alma y espíritu un sentido imperativo de cambio en mi forma de pensar.

Todo trabajo es importante, pero lo significativo es abocarse realmente y de la mejor manera posible, luchemos por un mañana más brillante.

RESUMEN

MODIFICACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN VEHÍCULO AÉREO CONTROLADO REMOTAMENTE PARA LA OBTENCIÓN DE TOPOGRAFÍAS

Alan Erubiel García Guevara
Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica
División de Estudios de Posgrado e Investigación del
Instituto Tecnológico de Chihuahua
Chihuahua, Chih., 2018
Director de Tesis: Dr. Marcelino Anguiano Morales

En la literatura revisada se observó que existen distintas técnicas de digitalización y reconstrucción tridimensional de objetos reales y de topografía, las cuales requieren diferentes perspectivas como la visión estéreo que es un método óptico pasivo para la estimación de profundidad.

En este proyecto de investigación se diseñaron y adaptaron diversos elementos a un vehículo aéreo controlado remotamente para realizar digitalizaciones tridimensionales haciendo uso de la perfilometría óptica. Se propuso el uso de un multicoptero cuatrirrotor equipado con una cámara digital de alta resolución y un dispositivo de proyección para realizar una digitalización tridimensional en alta resolución de objetos y escenas reales. Durante la exploración y recopilación de trabajos realizados con multicopteros, se determinó el uso del método de reconstrucción tridimensional mediante el uso de luz estructurada. Debido a que comercialmente no hay proyectores lo suficientemente ligeros y con la intensidad luminosa adecuada, se diseñó un proyector basado en tecnología LED para la proyección de patrones de luz codificada. Finalmente, el proyector fue adaptado al vehículo aéreo no tripulado (UAV por sus siglas en inglés).

La implementación de esta técnica genera la topografía de una región u objeto en tercera dimensión a través de la captura de la información de la imagen obtenida con la cámara, aplicando el análisis de franjas. La técnica que se emplea para la reconstrucción de topografías ha sido muy empleada en los campos académicos e industriales en situaciones y ambientes controlados, pero esta técnica ha sido poco estudiada con el uso de una aeronave no tripulada.

ABSTRACT

MODIFICATION OF THE BASIC CONFIGURATION OF A REMOTELY CONTROLLED AIR VEHICLE FOR OBTAINING TOPOGRAPHIES

Alan Erubiel García Guevara
Master of Science in Electronic Engineering
Division of Postgraduate Studies and Research
Technological Institute of Chihuahua
Chihuahua, Chih., 2018
Thesis Director: Dr. Marcelino Anguiano Morales

In the reviewed literature it was observed that there are different techniques of digitization and three-dimensional reconstruction of real objects and topography, which require different perspectives such as the stereo vision that is a passive optical method for the estimation of depth. In this research project we designed and adapted various elements to a remotely controlled air vehicle to determine three-dimensional reconstructions using optical profilometry. It was proposed the use of a multi-camera quad-robot equipped with a high-resolution digital camera and a projection device to perform a high-resolution three-dimensional scanning of objects and real scenes. During the exploration and compilation of works performed with multicopters, the use of the three-dimensional reconstruction method was determined through the use of structured light. Because commercially there are no projectors that are light enough and with adequate light intensity, a projector was designed based on LED technology for the projection of coded light patterns. The projection system was adapted to the unmanned aerial vehicle (UAV).

With this technique we generated topography of a region or object in third dimension through the capture of the information with a digital camera and processing the image applying the analysis of fringes. The technique that was used for the reconstruction of topographies has been widely used in the academic and industrial fields for situations and controlled environments, but this technique has been little studied with the use of an unmanned aircraft.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	<i>xi</i>
LISTA DE TABLAS	<i>xiv</i>
INTRODUCCIÓN	<i>xvi</i>
CAPÍTULOS	
CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II TÉCNICAS DE DIGITALIZACIÓN DE OBJETOS	6
2.1 Técnicas estereoscópicas.	6
2.1.1 Técnicas de no contacto ópticas pasivas.	7
2.1.2 Estructura por Movimiento (SfM).	7
2.1.3 Fotogrametría	7
2.2 Técnicas que utilizan luz estructurada.	9
2.2.1 Métodos de recuperación de fase.	9
2.2.2 Transformada de Hilbert.	11
2.2.3 Proyección de línea.	12
2.2.4 Método de Fourier- Takeda.	12
2.2.5 Método de desplazamiento de fase.	15
2.2.5.1 Ventajas y desventajas del método de desplazamiento de fase.	18
2.3 Proyección de franjas (técnica elegida).	18
CAPÍTULO III DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO AÉREO	21
3.1 Anatomía de un cuadricóptero.	21
3.2 Instrumentación del UAV.	24
3.2.1 Unidad de adquisición de imagen	26
CAPÍTULO IV ADAPTACIONES AL DISPOSITIVO AÉREO	27
4.1 Proyección de patrones.	27
4.1.1 Modelado óptico.	29
4.2 Modelado tridimensional.	30
4.3 Impresión tridimensional.	32
4.4 Iluminación.	34
4.4.1 Disipación de calor.	35
4.4.2 Alimentación.	36
4.5 Adecuación de campo visual de la cámara.	37
CAPÍTULO V INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL APLICADO	40
5.1 Microcontrolador.	40
5.2 Protocolo TCP/IP.	43
5.3 Sensor de distancia	44

5.4	Altímetro.	46
5.5	Electrónica	47
5.6	Comunicación inalámbrica.	50
CAPÍTULO VI	PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN Y OBTENCIÓN DE TOPOGRAFÍA	55
6.1	Caracterización de la cámara.	55
6.2	Algoritmo de reconstrucción.	58
6.2.1	Conversión a tonos de grises.	59
6.2.2	Transformada discreta de Fourier.	59
6.2.3	Localizar primer armónico.	60
6.2.4	Filtrado en el dominio de la frecuencia.	60
6.3	Plano de prueba.	61
CAPÍTULO VII	RESULTADOS	64
7.1	Análisis de resultados.	65
7.2	Reconstrucción 3D del objeto bajo prueba en ambiente no controlado.	69
CAPÍTULO VIII	CONCLUSIONES	72
	BIBLIOGRAFÍA	74
	APÉNDICES	79

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II	TÉCNICAS DE DIGITALIZACIÓN DE OBJETOS	6
Figura 2.1	Funcionamiento de la estereofotogrametría.	6
Figura 2.2	Desenvolvimiento de fase de una señal.	10
Figura 2.3	Geometría de ejes cruzados para el método de desplazamiento de fase.	16
Figura 2.4	Secuencia de patrones de franjas proyectadas en un objeto con desfase de 90°.	16
Figura 2.5	Arreglo de triangulación para técnicas de luz estructurada.	19
Figura 2.6	Geometría de la técnica de proyección de franjas.	19
CAPÍTULO III	DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO AÉREO	21
Figura 3.1	Esquema típico de un multicoptero o UAV, del tipo cuadricóptero.	22
Figura 3.2	Componentes principales de un Control Electrónico de Velocidad (ESC) de un UAV.	23
Figura 3.3	Motor eléctrico trifásico sin escobillas.	23
Figura 3.4	Cuadricóptero Walkera Scout X4.	24
Figura 3.5	Dispositivo o módulo de conexión de estación terrestre bluetooth BT-2401B entre tableta de mano y UAV.	25
Figura 3.6	Control Devo F12E.	25
Figura 3.7	Cámara Walkera® modelo iLook+.	26
CAPÍTULO IV	ADAPTACIONES AL DISPOSITIVO AÉREO	27
Figura 4.1	Formación de imágenes con una cámara pin-hole y un proyector.	28
Figura 4.2	Descripción gráfica de un proyector.	28
Figura 4.3	Esquema óptico del proyector.	30
Figura 4.4	Dibujo tridimensional de proyector de franjas en SolidWorks.	31
Figura 4.5	Disposición de componentes ópticas en el proyector.	31
Figura 4.6	Impresora Makerbot Replicator.	32
Figura 4.7	Piezas impresas en 3D para el montaje de lente condensadora y rejilla de Ronchi. a) Sin lente condensadora ensamblada, b) Con rejilla Ronchi ensamblada.	33
Figura 4.8	Proyector ensamblado.	33
Figura 4.9	Dimensiones del LED,	34
Figura 4.10	LED montado en tablilla, sobre la placa disipadora de calor.	34
Figura 4.11	Disipador de calor de un procesador de computadora.	35

Figura 4.12	Ventilador de 12 V sin escobillas.	36
Figura 4.13	Step-Up basado en el LM2577S.	37
Figura 4.14	Lente de Magnificación acoplada.	37
Figura 4.15	Modelo tridimensional de la cámara +iLook con sus respectivas adaptaciones.	38
Figura 4.16	Broches fabricados mediante impresión en 3D.	38
Figura 4.17	Cámara +iLook con sus adaptaciones pertinentes.	39
CAPÍTULO V	INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL APLICADO	40
Figura 5.1	Diagrama a bloques de la arquitectura interna del ESP8266.	41
Figura 5.2	ESP8266 en tarjeta NodeMCU.	42
Figura 5.3	Pin out del NodeMCU.	42
Figura 5.4	Etapas usadas para la comunicación TCP/IP.	43
Figura 5.5	Principio de funcionamiento de los sensores de ultrasonido.	45
Figura 5.6	Diferencia entre alta y baja frecuencia.	45
Figura 5.7	Sensor ultrasónico MAXBOTIX EZ-03.	46
Figura 5.8	Sensor de altitud MPL3115A2.	47
Figura 5.9	Level Shifter. a) Esquemático del level shifter, b) Tablilla con 4 level shifters.	48
Figura 5.10	Diagrama esquemático del circuito electrónico adaptado al drone.	49
Figura 5.11	Sistema embebido con conectores para conexiones.	50
Figura 5.12	Configuración cliente-servidor.	50
Figura 5.13	Conexión a red generada por el ESP8266.	51
Figura 5.14	Conectividad entre cliente y punto de acceso.	52
Figura 5.15	Activación y desactivación del proyector de franjas desde el cliente.	53
Figura 5.16	Óptica de ejes cruzados para transformada de Fourier en drone.	54
Figura 5.17	Distancia leída del sensor de distancia.	54
CAPÍTULO VI	PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN Y OBTENCIÓN DE TOPOGRAFÍA	55
Figura 6.1	Cámara CMOS marca Walkera® modelo iLook+.	56
Figura 6.2	Lente acoplada.	56
Figura 6.3	Esquemático de planos de prueba de la lente adaptada.	57
Figura 6.4	Comparación de imágenes capturadas con la cámara del drone. a) Imagen obtenida con la cámara a 3 metros de distancia, b) Imagen obtenida con la cámara con magnificación óptica.	58
Figura 6.5	Drone Walkera Scout X4, equipado con una cámara iLook + y un pequeño proyector.	61
Figura 6.6	Plano de trabajo.	63
CAPÍTULO VII	RESULTADOS	64
Figura 7.1	Proyector marca Toshiba® modelo TDP-FF1.	65
Figura 7.2	Cámara CCD marca Thorlabs® modelo DCU224C acoplada con una lente marca Tamaron® modelo 23FM16.	65

Figura 7.3	Arreglo experimental en condiciones de laboratorio.	66
Figura 7.4	Proyección de franjas en ambiente controlado a) Proyección de franjas con proyector comercial, b) Proyector óptico.	66
Figura 7.5	Obtención de fase mediante la proyección de franjas. a) Proyector comercial, b) Proyector propuesto.	67
Figura 7.6	Obtención del perfil de altura del objeto bajo prueba con el mismo arreglo para un proyector comercial y el del diseño propuesto.	67
Figura 7.7	Mapa de fase obtenida en ambiente controlado. a) Fase envuelta, b) Fase desenvuelta.	68
Figura 7.8	Reconstrucción del objeto en 3D obtenido a partir del mapa de fase.	68
Figura 7.9	Patrón proyectado sobre el objeto bajo prueba registrado por la cámara del drone.	69
Figura 7.10	Mapa de fase obtenida de la imagen registrada con el sistema adaptado al drone. a) Fase envuelta, b) Fase desenvuelta.	70
Figura 7.11	Reconstrucción tridimensional del objeto bajo prueba a una altura de vuelo de 2.99 m.	70
Figura 7.12	Obtención del perfil de altura del objeto bajo prueba a partir de los datos registrados mediante los dispositivos implementados en el drone modificado y los obtenidos en laboratorio.	71

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO II	TÉCNICAS DE DIGITALIZACIÓN DE OBJETOS	6
Tabla 2.1	Características especiales de los diferentes tipos de fotogrametría.	8
CAPÍTULO V	INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL APLICADO	40
Tabla 5.1	Capas del protocolo TCP/IP.	44

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Es innegable la importancia de los avances tanto de la industria aeronáutica, civil y militar en las últimas décadas. Hoy en día existen muchos problemas en las actividades diarias que resultan laboriosas o difíciles para el ser humano, situaciones fuera del alcance del cuerpo humano o en su defecto situaciones peligrosas para el mismo, que se derivan de los desastres naturales o consecuencia de errores humanos. Problemas que son posibles resolver con los avances tecnológicos para salvaguardar vidas. Existen muchos casos en los cuales es casi imposible que un ser vivo ingrese a determinadas áreas por cuestiones de seguridad; tales como ambientes tóxicos, edificios en riesgo de colapso, lugares confinados de difícil acceso, etc. Para poder cubrir las necesidades de acceder a zonas complicadas o riesgosas, se ha logrado que día con día la tecnología avance de manera impresionante ofreciendo más y mejores alternativas, como el emplear vehículos no tripulados para la realización de tareas de alto riesgo en misiones de reconocimiento y de tal forma que se puedan salvaguardar la integridad física del ser humano.

Los vehículos aéreos no tripulados *UAV* (*Unmanned Aerial Vehicle*, por sus siglas en inglés), son una herramienta tecnológica considerada actualmente de punta, con grandes beneficios y aplicaciones para la humanidad en investigaciones relacionadas con el monitoreo aéreo en aspectos, desde civiles como la fotografía aérea hasta militares [1]. Los *UAV* tienen la capacidad de entrar a zonas inaccesibles con ciertas ventajas que estos pueden ofrecer como volar en una posición estática como es el caso de los multicopteros adquiriendo datos de su región de interés, ya sea censado de gases ambientales, temperaturas, imágenes, monitoreo de la salud vegetativa, agricultura de precisión, vigilancia y monitoreo de zonas de alta incidencia de asaltos, vigilancia de zonas verdes para combatir la caza furtiva, controlar la vida salvaje y reducir el riesgo de incendios, forestación urbana, manejo de emergencias, monitoreo de tráfico, filmación aérea, resguardo de zonas protegidas, mapeo y monitoreo de zonas de desastre para suministrar ayuda, monitoreo ambiental y control biológico entre otras representan áreas de aplicación actuales para los vehículos aéreos no tripulados [2]. Comúnmente éste tipo de vehículos cuentan con una

cámara de alta resolución para poder tomar fotografías de zonas remotas y que el piloto pueda ver en donde está maniobrando.

Los *UAV* tienen el propósito de generación de topografías de las zonas de interés y aportan una serie de ventajas muy útiles para este tipo de tareas mencionadas anteriormente por sus evidentes ventajas como poco peso. Además, estos vehículos llenan ciertas necesidades las cuales los satélites artificiales y vehículos tripulados no pueden cubrir debido a su costo, resolución y accesibilidad para adquirir información [3]. Sin embargo, su auge masivo comenzó hace apenas una década, tras la reducción de costos de sistemas. Hoy en día, algunas disciplinas científicas no podrían prescindir de los vuelos rasantes de estos dispositivos por lo que es necesario en muchos casos realizar algunas implementaciones instrumentales a la configuración básica, dependiendo del uso específico que se le dará. Entre los diferentes *UAV*, se encuentran los aviones no tripulados cuya principal función es recoger imágenes de alta calidad con el fin de obtener un mayor nivel de detalle y precisión en comparación con apreciar la información a simple vista. Así como, los drones, los cuales pueden llevar una gran variedad de instrumentos de detección, incluyendo sensores de luz visible, infrarrojo cercano (*NIR*), infrarrojo térmico (*TIR*), radar, y sensores multi-espectrales, etc. Además, los *UAV* toman elementos de áreas como la aero-espacial, inteligencia artificial, sistemas de comunicación, sistemas de orientación satelital: GPS (Global Positioning System, por sus siglas en inglés), *GLONASS* (Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema; por sus siglas en ruso), Galileo (Sistema de Posicionamiento Global Europeo), sistemas embebidos y transporte.

Por otro lado, las técnicas de adquisición de imágenes aéreas utilizadas hasta antes de la aparición de los *UAV* poseen varias limitaciones tales como altos costes de vuelo, maniobrabilidad restringida, baja resolución etc. Mediante los satélites artificiales se pueden recopilar imágenes de dimensión gigantesca, que cubren vastas áreas de la superficie de la Tierra. Sin embargo, su adquisición es muy lenta y solo posible con condiciones meteorológicas favorables [4]. Además, existen situaciones en que se necesitan imágenes de alta resolución difícil de obtener a través de un satélite, debido a que a medida que aumenta la cobertura disminuye el nivel de detalle de las imágenes obtenidas. Así como, el uso de aviones tripulados y la técnica de mapeo *LIDAR* (*Airbone Light Detection and Ranging*) es una herramienta

tecnológica para crear información 3D de buena resolución y precisión, el uso de aviones tripulados lo hace muy costosa. El uso de sistemas aéreos no tripulados permite registrar imágenes con gran detalle a la vez que las imágenes obtenidas no sufren perturbaciones producidas por fenómenos atmosféricos como nubes o niebla [5].

En otro aspecto, existen diversas técnicas ópticas para llevar a cabo la digitalización o reconstrucción de la topografía de un objeto de interés, entre estas se encuentran las que dependen de la diferencia en perspectiva entre dos imágenes como lo es la visión estéreo que es un método *óptico pasivo* para la estimación de profundidad, que depende en obtener imágenes ligeramente diferentes tomadas de una misma escena con dos o más cámaras. Este método tiene problemas en la textura de regiones pequeñas donde la búsqueda de correspondencias entre las múltiples vistas se hace imposible, lo cual finalmente genera una nube de puntos dispersos. De los métodos *ópticos activos*, las cámaras de tiempo de vuelo demuestran ser compactas y buenas herramientas de medición de profundidad con una elevada capacidad de respuesta. Sin embargo, la precisión de la profundidad usualmente está todavía lejos de los resultados que se consiguen con las técnicas de escaneado 3D o de imagen estereoscópica, y la nube de puntos que generan por lo general no son muy densos. La mayoría de estas técnicas propuestas, son convenientes para su uso al aire libre, mientras que sólo unas pocas de ellas han sido diseñadas para entornos cerrados.

Por lo anterior, el principal objetivo de la investigación fue obtener reconstrucción 3D mediante la combinación de la técnica de proyección de franjas y un drone, en el cual se le adaptaron diversos sensores de medición y control, para poder adquirir el valor de los parámetros involucrados en la técnica de proyección de franjas. El interés de esta técnica radica en que la zona de interés puede estar ubicado dentro de edificios viejos, lugares con algún material toxico o explosivo en el medio, o simplemente una zona de difícil acceso donde el realizar la toma de datos puede ser riesgosa para el ser humano.

Nuestra motivación por realizar la investigación se basa en que la situación actual de aviones no tripulados en aplicaciones de detección remota en el área de perfilometría óptica se encuentra todavía en una fase inicial, pero es razonable anticipar el papel de la detección remota mediante

técnicas ópticas adaptadas a drones ya que creemos que en un futuro próximo superará a los aviones con tripulación.

La técnica implementada requiere de un sistema de visión y un sistema de proyección. El drone viene equipado con una cámara de alta resolución de bajo peso. Por otro lado, actualmente es imposible usar un proyector comercial en nuestra propuesta, debido a su peso y a la necesidad de conectarlo a una fuente de corriente. Nos vimos en la necesidad de diseñar un proyector miniaturizado de poco peso y de bajo consumo eléctrico.

Sin embargo, su desempeño puede estar limitado a su uso en interiores, debido a la necesidad de proyectar patrones codificados con un alto contraste de luz visible. Existen diferentes áreas de aplicación del tema de investigación, tales como la exploración de sitios inaccesibles, documentación arqueológica, restauración, entre otros, para los cuales la utilización de un modelo tridimensional resulta de gran ayuda.

Este proyecto de tesis se divide en siete capítulos los cuales reflejan la investigación realizada. Los capítulos se mencionan a continuación con una breve descripción del contenido:

- Capítulo I: Breve introducción, para poner en contexto al lector con la descripción del problema y la justificación del proyecto.
- Capítulo II: Abarca el estado del arte del proyecto, referente a reconstrucciones tridimensionales. Revisión de las técnicas de perfilometría tridimensional (3D) más populares, presentando sus ventajas y desventajas, los atributos intrínsecos de los sistemas y la razón del porqué se decidió trabajar, con la técnica de perfilometría por transformada de Fourier.
- Capítulo III: Presenta la teoría de ciertos componentes de que se emplearon a lo largo de la tesis.
- Capítulo IV: Adaptación de componentes al drone.

- Capítulo V: Se presenta al lector la instrumentación y control aplicado en las diversas etapas de nuestro sistema.
- Capítulo VI: Explica las consideraciones tomadas en cuenta de la técnica perfilometría por transformada de Fourier y el procesamiento para la adquisición de información.
- Capítulo VII: Se muestran los resultados obtenidos el arreglo experimental tales como la reconstrucción de escenas.
- Capítulo VIII: Trabajo futuros y conclusiones del proyecto.

CAPÍTULO II

TÉCNICAS DE DIGITALIZACIÓN DE OBJETOS

En este capítulo se revisan las técnicas ópticas más comunes para la adquisición de forma y profundidad de objetos. Se hace énfasis en las técnicas que emplean luz estructurada, principalmente en la proyección de franjas, ya que es la que se implementará para la adquisición de superficies mediante un dispositivo móvil.

Existen diversas técnicas ópticas para llevar a cabo el digitalizado o reconstrucción de la topografía de un objeto, como las que necesitan de la proyección de un patrón de luz. A continuación, describiremos el respaldo matemático de algunas técnicas de reconstrucción 3D.

2.1. Técnicas estereoscópicas

A las técnicas que utilizan diferencia en perspectiva entre dos o más imágenes tomadas del mismo objeto, se les conoce como técnicas de fotografía estéreo. En el caso de la estereofotogrametría, la técnica funciona en las mismas premisas que el sistema de visión humana cuando una persona mira un punto en específico, la distancia al punto es determinada comparando su aparente cambio de posición entre los dos ojos, ejemplo de esto se muestra en la Figura 2.1, en donde se aprecia que pequeño cambio de posición del punto, significa que el punto está distante, mientras que un cambio grande significa cerca. Este enfoque utiliza técnicas de perspectiva, reglas de iluminación, reconocimiento automático de patrones y fuerte uso de gráficos por computadora. Las principales ventajas de este enfoque son la simple instrumentación necesaria, generalmente dos cámaras digitales y la velocidad de adquisición. La precisión de los modelos digitalizados, sin embargo, es algo pobre, generalmente algunos milímetros [6].

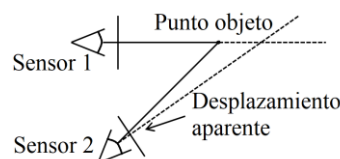


Figura 2.1 Funcionamiento de la estereofotogrametría.

2.1.1 Técnicas de no contacto ópticas pasivas

Dentro de las técnicas de no contacto ópticas pasivas se presentan la técnica de estructura por movimiento (*SfM*), Structure from Motion, por sus siglas en inglés y la de fotogrametría. La técnica *SfM*, consiste en el análisis de la posición de 1 o n cámaras para poder realizar una reconstrucción en tercera dimensión.

2.1.2 Estructura por Movimiento (*SfM*)

La técnica óptica pasiva de *Estructura por Movimiento* (por sus siglas en inglés, *SfM* o *Structure from Motion*), es una técnica que consiste en el análisis de la posición de 1 o n cámaras para poder realizar una reconstrucción en tercera dimensión mediante la toma de fotografías del entorno desde diferentes perspectivas. Las imágenes adquiridas son procesadas para obtener la topografía representada como una nube densa de puntos, la cual es una de las principales ventajas que ofrece la técnica *SfM*. Las imágenes que son usadas para la generación de la topografía, son tomadas a partir de distintas posiciones de la cámara, en la etapa de procesamiento inicial la cual requiere encontrar la identificación de características en imágenes individuales para correlacionar las imágenes entre ellas mismas por características iguales, para empatar las fotografías no es crucial que estén a escala por lo que la orientación proporcionada por las coordenadas necesarias del objeto. Los programas que se encargan de realizar estas semejanzas entre las imágenes cuentan con algoritmos para lograr las identificaciones, gracias a la búsqueda de puntos clave, lo cual genera una base de datos de puntos de interés entre todas las imágenes que nos ayudará a relacionarlas entre ellas [7]. Para la detección de estos puntos clave en una imagen se depende de las texturas de los objetos, la resolución de la imagen, la distancia entre la cámara y las características de interés. Para incrementar la resolución de la reconstrucción es necesario obtener una gran cantidad de imágenes lo que incrementará el tiempo de procesado de la información para una posterior reconstrucción [8].

2.1.3 Fotogrametría

La fotogrametría que deriva del vocablo “fotograma” de “phos”: luz, “gramma”: dibujo y “metrón” medir: “medir sobre fotos”, es una técnica óptica pasiva que consiste en la captura de

dos o más imágenes de un mismo objeto desde diferentes perspectivas con una cámara digital con una calidad de imagen similar a la de las cámaras analógicas tradicionales para convertirse en escáneres de alta precisión. La técnica puede ser de corto o largo alcance. Básicamente, es una técnica de medición de coordenadas 3D, que utiliza sistemas de percepción remota junto con puntos de referencia topográficos sobre el terreno, como medio fundamental para la medición. Lo que se busca en la captura de dos imágenes del mismo punto se encuentre desplazado en las imágenes, con esta técnica se obtiene la magnitud del desplazamiento y se encuentra la profundidad de dicho punto.

Entre sus aplicaciones que presenta la fotogrametría son la agronomía, cartografía, ortofotografía, arquitectura, planeamiento y ordenamiento territorial, medio ambiente, arqueología, control de estructuras, mediciones, topografía, biomecánica, investigación policial, entre otros. La principal desventaja de esta técnica consiste en que existe un problema con la correspondencia y usualmente es necesario agregar marcas para orientar las imágenes. Existen varias formas de hacer fotogrametría (ver Tabla 2.1). Entre los que comúnmente se pueden apreciar la fotogrametría terrestre y aérea.

Tabla 2.1 Características especiales de los diferentes tipos de fotogrametría.

Tipo de fotogrametría	Características
Analógica	Son los modelos matemáticos utilizados. Es la primera parte de la fotogrametría en desarrollarse.
Analítica	Aplica los modelos matemáticos a objetos físicos.
Digital	Sustituye la imagen analógica por la imagen digital, del mismo modo que empieza a utilizar programas informáticos.
Aérea	Las estaciones de estudio se encuentran en el aire. Se aplica en especial para la elaboración de planos y/o mapas para el desarrollo de proyectos de ingeniería.
Terrestre	Las estaciones se encuentran a nivel del suelo, por lo que las limita a un espacio determinado.

2.2 Técnicas que utilizan luz estructurada

La técnica que involucra la proyección de un patrón de franjas es probablemente la más eficiente, ya que se puede adquirir una mayor superficie en una sola imagen. Su funcionamiento consiste en la recuperación de la fase relacionada con el perfil del objeto bajo estudio. En general, este método es el más veloz, ya que requiere de una sola imagen para reconstruir una superficie.

2.2.1 Métodos de recuperación de fase

La medición rápida y precisa del perfil en 3D es necesaria en muchas aplicaciones industriales, incluida la ingeniería inversa, replicación en 3D, inspección, visión por ordenador y en sistemas de control de calidad. La perfilometría basada en luz estructurada y proyectada digitalmente con n desplazamientos de fase conocida, es una técnica de medición de formas, sin contacto, con una velocidad rápida y una alta precisión [9]. La perfilometría por luz estructurada ha sido una gran herramienta para la medición 3D, especialmente para aplicaciones que requieren la adquisición de nubes densas de puntos. Sin embargo, durante la medición usando luz estructurada, existe un problema técnico clave llamado reconstrucción de fase o bien; desenvolvimiento de fase [10]. Debido a que la fase reconstruida mantiene una relación lineal con la altura del objeto, resulta extremadamente importante introducir un método de reconstrucción de fase rápido pero eficaz. Para la obtención de la reconstrucción de fase es necesario obtener los datos de fase continua de los patrones de franja proyectados sobre el objeto. El proceso de reconstrucción de fase, podría ser corrompido por ruido, franja abrupta, discontinuidades y fase anormalmente distribuida [11].

Por lo general, el desenvolvimiento de fase 2D implica desenvolver la matriz donde cada elemento representa un valor de fase envuelta. Las imágenes de fase del plano real no tienen una señal válida en todas las ubicaciones de píxeles [12]. Por esta razón, durante el proceso de desenvolvimiento algunos píxeles presentan saltos abruptos que evitan percibir la fase correctamente, por ese motivo es necesario realizar un procedimiento para conectar los saltos abruptos en la fase, asumiendo una continuidad espacial de la distribución de la fase, lo cual es necesario para obtener una distribución física final.

Uno de los métodos usados para lograr el desenvolvimiento de fase, consiste en tomar la matriz donde se encuentra la fase eliminando las discontinuidades existentes en ella. Cuando la diferencia entre dos valores adyacentes en fase excede a π , y la fase unitaria a la entrada se encuentra en radianes, entonces se puede utilizar la ecuación (2.1). Donde $P_Out[i]$ es la fase desenvuelta, P es la fase y N es la longitud de la fase. En la Figura 2.1 se aprecian dos gráficos en los que se muestran los efectos del desenvolvimiento de fase, el primer gráfico muestra la fase original antes de desenvolverla, y el segundo gráfico muestra la fase después de desenvolverla.

$$P_Out[i] = \begin{cases} P[i] - \left\lfloor \frac{P[i] - [P[i-1]]}{2\pi} + 0.5 \right\rfloor * 2\pi & i = 1, \dots, N-1 \\ P[i] & i = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

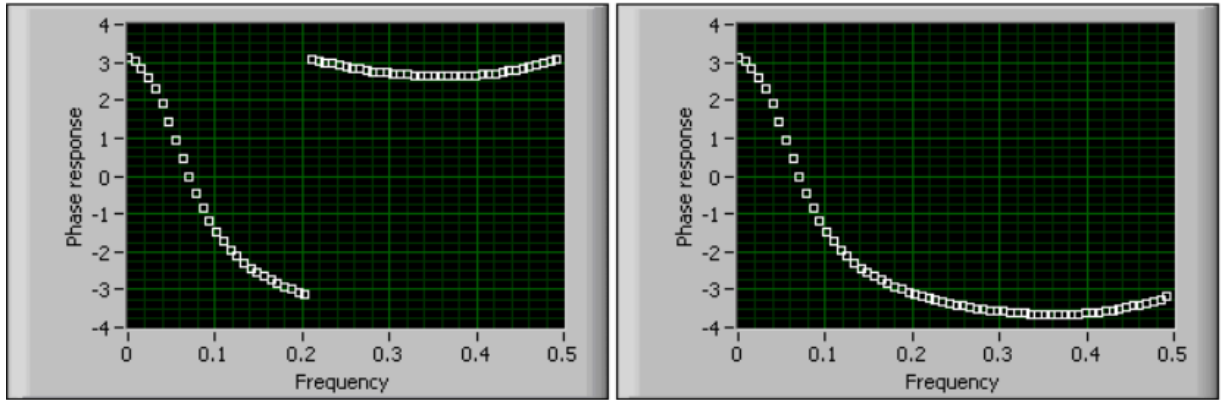


Figura 2.2 Desenvolvimiento de fase de una señal.

Se puede aplicar el desenvolvimiento para procesar la fase lineal en un sistema invariante en el tiempo. La respuesta de fase se define como el ángulo complejo de la respuesta de frecuencia de un sistema y se calcula la respuesta de fase como ángulos dentro de $(-\pi, \pi)$ o, en otras palabras, como ángulos dentro de un círculo de $2 * \pi rad$. Debido a que los múltiplos de $2 * \pi$ se envuelven cuando calcula la respuesta de fase, a menudo se presentan discontinuidades en la respuesta de fase [14].

Actualmente todos los algoritmos de reconstrucción de fase son clasificados en dos tipos principales: algoritmos dependientes de trayectoria local y algoritmo global. El primero significa que el proceso de reconstrucción de fase se realiza píxel por píxel [14]. El algoritmo de reconstrucción de fase local comienza con el mejor píxel y termina en el píxel más pobre, y su ruta de reconstrucción es óptima [15].

El algoritmo local típico es el método guiado por la calidad. Esto último significa que el proceso de reconstrucción de fase global se implementa mediante la transformada rápida de Fourier o transformada discreta de coseno. Sus algoritmos típicos incluyen principalmente el cuadrado mínimo ponderado y los algoritmos de mínimos cuadrados no ponderados [12].

2.2.2 Transformada Hilbert

La transformada de Hilbert se utiliza para obtener una franja de seno de una franja de coseno. El método utiliza un filtro pasa altas para eliminar las variaciones de fondo y la señal analítica se utiliza para obtener una imagen compleja a partir de franjas de seno y coseno. En el método propuesto, la fase estimada se obtiene directamente de la imagen compleja (señal analítica). El método requiere sólo un patrón de franja y es, por lo tanto, adecuado para la medición de deformación dinámica.

La transformada de Hilbert en procesamiento de señales y en matemáticas. La transformada de Hilbert fue originalmente definida para señales periódicas, o de forma equivalente para señales en el círculo, en cuyo caso se da por convolución con el núcleo de Hilbert. La transformada de Hilbert es también importante en el campo del procesamiento de la señal donde se utiliza para derivar la representación analítica de una señal $f(x)$.

La Transformada de Hilbert toma una señal $f(x)$ y entrega una función $(H[f])(x)$, con el mismo dominio, esto es definido por la ecuación 2.2 [16].

$$(H[f])(x) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(h)}{x-h} dh \quad (2.2)$$

2.2.3 Proyección de línea

Su principio fundamental consiste en proyectar una línea o borde sobre la superficie del objeto del cual se desea obtener su información. El funcionamiento de ésta técnica consiste en la proyección de una línea que sufre deformaciones provocadas por el relieve del objeto de interés y donde estas deformaciones son captadas con una o n cámaras. Convencionalmente éste tipo de escáneres son utilizados en donde los enfoques giran el escáner alrededor de un eje no ortogonal al plano de escaneo.

Las configuraciones giratorias populares crean el movimiento giratorio usando un solo motor y un cardán. Con el fin de obtener nubes de puntos precisas con estos sensores, la ubicación exacta del centro del espejo giratorio del escáner láser 2D se establece con respecto al eje de rotación externo [17].

Para todos los tipos de escáner se define el marco de coordenadas del escáner bidimensional, que llamado marco primario, para residir en el centro del espejo giratorio del escáner (considerado el origen de los rayos láser). El eje X positivo se enfrenta en la dirección del rayo de exploración central mientras que el eje Z es ortogonal al plano de exploración, de modo que los rayos individuales cubren un intervalo consecutivo de ángulos de que son representados en la ecuación 2.3.

$$-\frac{\varphi}{2}, +\frac{\varphi}{2} \quad (2.3)$$

Para un campo de visión total de φ [18].

2.2.4 Método de Fourier-Takeda

Este método tiene la ventaja de utilizar sólo un patrón de franjas. El principio de reconstrucción consiste en recuperar la fase en una señal que se encuentra modulada en la señal

portadora, haciendo uso de filtros en el dominio de la frecuencia y de las propiedades de la transformada de Fourier [19].

Una señal de una dimensión con frecuencia espacial detectada, puede ser expresada como:

$$g(x) = a(x) + b(x) \cos[2\pi f_0 x + \varphi(x)] \quad (2.4)$$

Donde $a(x)$ es la intensidad de fondo no deseada (variaciones de fondo), $b(x)$ es la amplitud de la señal, $\varphi(x)$ es la fase la cual se asume varía más lento que f_0 , la cual es la frecuencia portadora espacial.

Reescribiendo $g(x)$ en su forma compleja:

$$g(x) = a(x) + \frac{1}{2}b(x) \exp[i\varphi(x)] \exp(2\pi i f_0 x) + \frac{1}{2}b(x) \exp[-i\varphi(x)] \exp(-2\pi i f_0 x) \quad (2.5)$$

$$g(x) = a(x) + c(x) \exp(2\pi i f_0 x) + c^*(x) \exp(-2\pi i f_0 x) \quad (2.6)$$

$$c(x) = \frac{1}{2}b(x) \exp[i\varphi(x)] \quad (2.7)$$

Donde $c(x)$ es la amplitud compleja de las franjas.

Siendo $c^*(x)$ el complejo conjugado de $c(x)$.

$$c^* = \frac{1}{2}b(x) \exp[-i\varphi(x)] \quad (2.8)$$

La transformada de Fourier de la señal $g(x)$ proporciona las componentes de frecuencia del espectro que constituyen la señal. La transformada de Fourier para una señal es definida como:

$$G(f) = F[g(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \exp(-2\pi i f x) dx \quad (2.9)$$

Al procesar la información proveniente de la señal y hacer uso de la transformada de Fourier se obtiene:

$$G(f) = A(f) + C(f - f_0) + C^*[-(f + f_0)] \quad (2.10)$$

Al aplicar la transformada de Fourier a la señal pasando la información al dominio de la frecuencia, se obtienen tres componentes: en el centro se encuentra el término $A(f)$, que son las componentes de la frecuencia que representan el ruido del fondo, separadas entre sí simétricamente se encuentra la parte real $C(f - f_0)$ y la parte imaginaria $C^*[-(f - f_0)]$ de la componente fundamental, lo cual permite realizar un filtro selectivo de la segunda componente del espectro, llamada componente fundamental.

Por metodología y conveniencia se elige el primer armónico $C(f - f_0)$ para ser filtrado. Se remueve la frecuencia portadora, se obtiene $C(f)$ y posteriormente se realiza un desplazamiento hacia el origen. El paso siguiente es aplicar la transformada de Fourier inversa al espectro filtrado $C(f)$.

La propiedad de la transformada inversa de Fourier, establece que la señal puede ser reconstruida por la superposición de los armónicos complejos, y es utilizada para recuperar la amplitud compleja de la señal, regresando la señal al dominio espacial:

$$c(x) = F^{-1}[C(f)] = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) \exp(2\pi ifx) df \quad (2.11)$$

Por último, se aplica el logaritmo natural a la señal compleja resultante para obtener:

$$\log[c(x)] = \log \frac{1}{2} b(x) + i\varphi(x) \quad (2.12)$$

Utilizando la ecuación (2.12) se puede extraer la amplitud y la fase deseada. Se obtiene una fase envuelta por lo que resulta necesario aplicar un algoritmo de desenvolvolvimiento de fase para corregir las ambigüedades que se presentan.

2.2.5 Método de desplazamiento de fase

A grandes rasgos, la mayoría de los algoritmos adoptan la extracción de fase espacial o temporal. En la extracción en fase espacial, el valor de fase de un píxel considerado se obtiene evaluando la intensidad de un número de píxeles espacialmente relacionados. Una técnica espacial típica es el método de transformada de Fourier, donde la señal de fase puede ser extraída a partir de un patrón de franjas. En los métodos temporales se mide un ángulo de fase mediante la evaluación de las intensidades de desplazamiento de fase de un píxel considerado.

Un método temporal comúnmente conocido es el algoritmo generalizado de desplazamiento de fase de N pasos, en el que N es un número igual o mayor que 3. El algoritmo recupera la mejor solución de fase en términos del error mínimo de mínimos cuadrados para un desplazamiento de fase conocido entre cada paso [21].

El método de desplazamiento de fase usa la geometría de ejes cruzados, similar a la geometría utilizada en la técnica Fourier-Takeda. El hardware utilizado en la técnica de desplazamiento de fase consiste en una computadora, proyector y cámara; el esquema es mostrado en la Figura 2.3 [22].

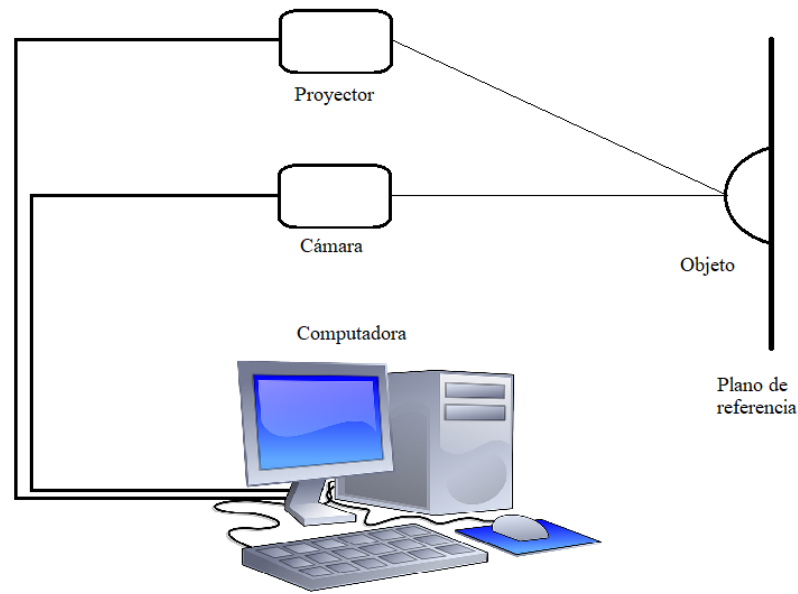


Figura 2.3 Geometría de ejes cruzados para el método de desplazamiento de fase.

Esta técnica puede ofrecer una buena precisión de medición cuando se introduce un cambio de fase preciso. Existen algoritmos que usan tres, cuatro y hasta cinco tomas para tener una mejor resolución espacial de tal forma que se puedan anular pequeñas vibraciones o bien para reducir el error de la calibración de la fase tal como se muestra en la Figura 2.4. Sin embargo esta técnica depende de un desplazamiento de fase conocido tal como lo mostrado en las ecuaciones (2.13) -(2.15).

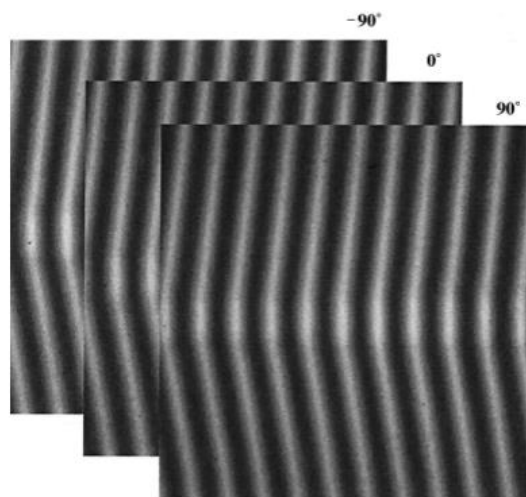


Figura 2.4 Secuencia de patrones de franjas proyectadas en un objeto con desfase de 90° .

En general, entre más corrimientos se tengan del patrón de franjas proyectado, mayor será la precisión en la reconstrucción obtenida, pero menor será la velocidad de medición. Para la medición precisa de la forma 3D en tiempo real se requiere un algoritmo de desplazamiento de fase de tres etapas y un desplazamiento en su fase de 120° teniendo como ventaja la simetría del sistema, sin embargo, el error de medición es sensible a cualquier error de imagen de franja causado por diversas fuentes, por ejemplo, el desenfoque provocado por movimiento o vibraciones [23].

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos(\varnothing(x, y) - \theta) \quad (2.13)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos(\varnothing(x, y)) \quad (2.14)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos(\varnothing(x, y) + \theta) \quad (2.15)$$

En donde $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$, $I_3(x, y)$ representan la intensidad en las imágenes, $I'(x, y)$ es el ruido fondo, $I''(x, y)$ es la intensidad y la modulación de la señal, el término $\varnothing(x, y)$ es la fase para ser resuelta, y θ es la constante del corrimiento de fase la cual puede ser calculada como:

$$\theta = \frac{2\pi}{N} \quad (2.16)$$

Donde N es el número total de capturas (en este caso particular $\theta = 120^\circ$ tal como se había mencionado anteriormente siendo que la razón es debido a que $N=3$), resolviendo las ecuaciones:

$$\varnothing_0(x, y) = \arctan \left[\sqrt{3} \frac{I_1(x, y) - I_3(x, y)}{2I_2(x, y) - I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right] \quad (2.17)$$

2.2.5.1 Ventajas y desventajas del método de desplazamiento de fase

El método de desplazamiento o corrimiento de fases requiere de la adquisición de algunos patrones de franjas tomadas con un conocido incremento de fase. Los algoritmos de perfilometría por corrimiento de fase son ampliamente utilizados en mediciones ópticas debido a las ventajas que ofrecen, tales como la medición punto por punto (dependiendo de la resolución de la cámara), y menor sensibilidad a variaciones en la superficie de reflectividad lo cual facilita la medición de objetos complejos con fuertes variaciones en su textura, haciendo el método menos sensible a la luz ambiental.

La perfilometría por desplazamiento de fase, cuenta con una precisión superior a otras técnicas de diferentes patrones, pero conlleva el problema de ambigüedad generado para superficies con discontinuidades mayores a 2π por el desplazamiento, aunado a esto demanda un alto tiempo de procesamiento y calibración. Otra de sus principales desventajas es que no puede ser usada en el estudio de eventos dinámicos. Por la misma naturaleza de la técnica requiere, se requiere un corrimiento de fase conocido y la necesidad de tener al menos tres proyecciones de franjas sinusoidales, por lo que el lugar en donde sea aplicada la técnica tiene que ser controlado, de tal forma que la precisión se verá afectada lo que lo hace tener una alta sensibilidad a los errores no-sinusoidales de la proyección.

2.3 Proyección de franjas (Técnica elegida)

Existen diversas técnicas de no contacto que emplean la proyección de patrones de luz estructurada (franjas) o ya sean franjas o patrones de colores. Al proyectar un patrón sobre una escena con variaciones de relieve, éstas provocan deformaciones en el patrón proyectado tal como es mostrado en la Figura 2.5. La imagen resultante es registrada por una cámara para posteriormente ser procesada.

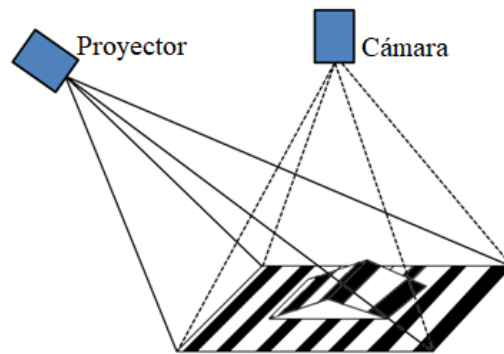


Figura 2.5 Arreglo de triangulación para técnicas de luz estructurada.

Si la escena es una superficie plana, el patrón registrado será similar al patrón proyectado. Sin embargo, si un objeto se coloca sobre la escena anterior, su forma geométrica distorsionará dicho patrón. El principio de luz estructurada consiste en extraer la forma geométrica del objeto de interés con base en la información obtenida de la distorsión del patrón proyectado. La relación geométrica entre la unidad de adquisición de imagen, el patrón de franjas y la superficie del objeto es expresada matemáticamente por el principio de triangulación.

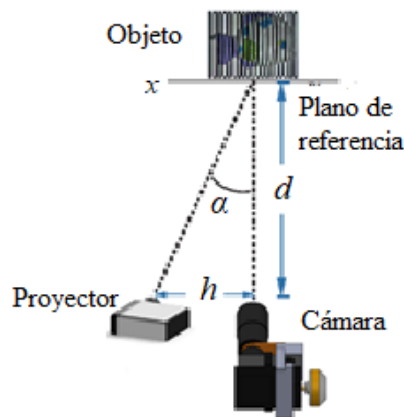


Figura 2.6 Geometría de la técnica de proyección de franjas.

En la Figura 2.6 se muestra una configuración típica de esta técnica, donde el proyector y la cámara se encuentran en el mismo plano a una distancia h entre ambos; el plano cámara-proyector se localiza a una distancia d del plano de referencia; α es el ángulo de intersección entre el eje de proyección y el de observación. El patrón cosenoidal proyectado es modelado como sigue:

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0(x, y) + \phi(x, y)] \quad (2.18)$$

Donde $I(x, y)$ es la intensidad observada del patrón de franjas, $a(x, y)$ representa la iluminación de fondo, $b(x, y)$ representa las variaciones de reflectancia del objeto, y $\phi(x, y)$ es la fase óptica que está dada por:

$$\phi(x, y) = 2\pi f_0(x, y) + \phi(x, y) \quad (2.19)$$

Donde $f_0(x, y)$ corresponde a la frecuencia espacial de la señal portadora y $\phi(x, y)$ es el término asociado de fase, mismo que será utilizado para aproximar la forma del objeto. Los algoritmos de extracción de fase, como el de la transformada de Fourier y el de corrimiento de fase, pueden utilizarse para extraer la fase envuelta de uno o varios patrones de franjas. Un proceso de desenvolvemento de fase puede usarse después para obtener una distribución continua de fase conteniendo tanto la fase relacionada con la forma del objeto $\phi(x, y)$, como la fase relacionada con el término de la señal portadora $2\pi f_0(x, y)$.

Finalmente el mapeo y escalamiento desde la fase desenvuelta $\phi(x, y)$, permiten encontrar la altura local de la superficie en función del ángulo α comprendido entre el proyector y la cámara mediante la siguiente ecuación:

$$z(x, y) = \frac{P_x}{2\pi \text{Sen}\alpha} \Delta \phi(x, y) \quad (2.20)$$

Donde $z(x, y)$ representa la altura del objeto medido desde el plano de referencia y P_x es el periodo observado del patrón de franjas. El patrón de intensidad contiene la información de la forma del objeto en las regiones donde se proyecta el patrón de luz.

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO AÉREO

Para el desarrollo de este trabajo se usó un vehículo aéreo no tripulado, si bien existe una gran variedad de dispositivos aéreos, se optó por usar un cuadricóptero debido a que son vehículos relativamente accesibles para aplicaciones civiles. A lo largo del capítulo se hará la descripción general de los dispositivos que componen un cuadricóptero.

3.1. Anatomía de un Cuadricóptero

El UAV de cuatro ejes es una aeronave con la capacidad de despegar y aterrizar verticalmente gracias a 4 rotores eléctricos. Estos dispositivos tienen una estructura simple de bajo costo, alta flexibilidad, y gozan de popularidad debido a su flexibilidad para ser ampliamente utilizados en la fotografía aérea, monitoreo ambiental, etc. Con el desarrollo de la tecnología los drones de cuatro rotores desempeñan labores cada vez más importantes. La mayoría de este tipo de drones pertenecen al tipo de aviones de baja altitud, cuyo vuelo va a una altitud de vuelo va de unos cuantos metros a varias decenas de metros en comparación con los aviones tradicionales.

Los componentes fundamentales de este tipo de aeronaves son: Sistema de control y Sistema de potencia (energía y batería). El sistema de control consiste en un controlador de vuelo y un controlador remoto y el sistema de potencia consta de un control de velocidad electrónico, un motor sin escobillas y una hélice. En la Figura 3.1 se muestra un esquema típico de las componentes descritas.

El controlador de vuelo es el sistema para controlar la aeronave de cuatro rotores con la finalidad de realizar las misiones de vuelo tales como despegue, aterrizaje y maniobrabilidad aérea. La potencia de salida es controlada en cada motor con su correspondiente energía para completar la acción apropiada tal como aterrizaje, lanzamiento e inclinación. Los controladores de vuelo siempre trabajan con GPS, giroscopio electrónico, brújula magnética y medidor de aceleración entre otros sensores, lo que podría ayudar en el cálculo de la altitud del vuelo y la recopilación de información sobre el entorno. Los controladores de vuelo también ayudan a

compensar errores en el hardware del UAV y disturbios externos provenientes del entorno en el que se encuentre el dispositivo, manteniendo la estabilidad del equipo en vuelo [24].

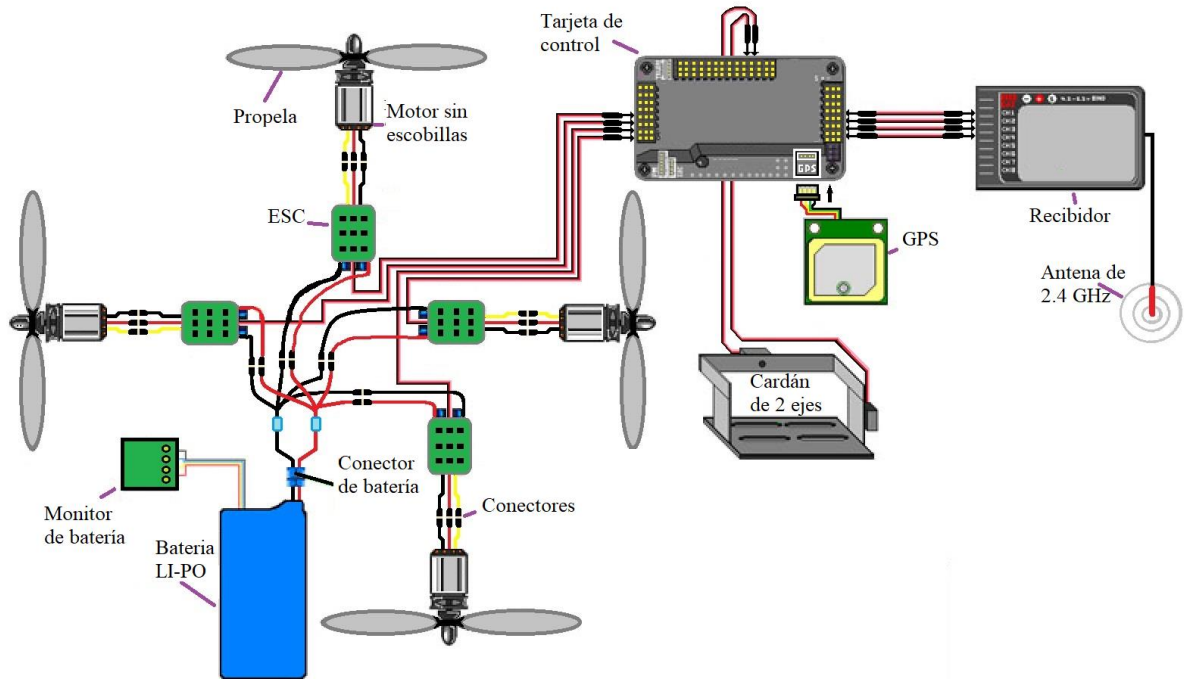


Figura 3.1 Esquema típico de un multicoptero o UAV, del tipo cuadricóptero.

El sistema de potencia del UAV con cuatro rotores está compuesto principalmente por el controlador electrónico de velocidad, el motor sin escobillas y la hélice. El control electrónico de velocidad conocido como ESC (*Electronic Speed Control*) es un sistema capaz de definir la velocidad de giro de un motor sin escobillas mediante la generación de pulsos compatibles con este tipo de motores.

Algunas características comunes de un ESC son un corte de baja tensión. El corte de baja tensión corta la potencia a los motores cuando la tensión cae a un nivel específico. Esta es una función de protección para las baterías LiPo (*Lithium Polymer*). Si el voltaje de una batería LiPo cae por debajo de su voltaje mínimo, puede dañar permanentemente la batería. El cut-off de baja tensión protege la batería de caer por debajo de su voltaje mínimo. Algunos ESC pueden ser programados para tener diferentes respuestas de aceleración, ajustar el límite de corte de baja

tensión, invertir la dirección del motor y cambiar la velocidad de conmutación. El ESC tiene cinco líneas: las líneas de señal conectadas al controlador de vuelo (la línea de entrada está conectada con la batería) las tres líneas de salida trifásica conectadas al motor, en la Figura 3.2 se aprecia una tablilla ESC usada en un cuadricóptero comercial.

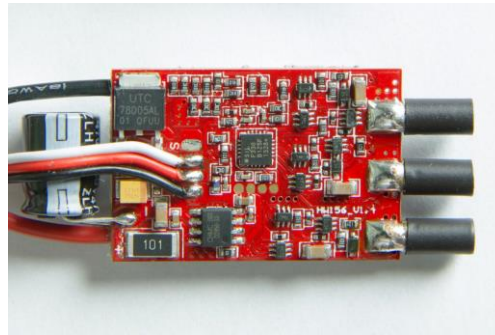


Figura 3.2 Componentes principales de un Control Electrónico de Velocidad (ESC) de un UAV.

Entre las componentes existentes de un UAV existe una parte fundamental: Un motor eléctrico sin escobillas de imán permanente con el estator que es la bobina. En la Figura 3.3 se muestra el motor trifásico empleado por los cuadricópteros comerciales. Al cambiar la frecuencia de onda alterna y la forma de onda que entra en la bobina del estator del motor sin escobillas, se puede formar un campo magnético alrededor de la bobina que gira alrededor de la geometría del motor. El campo magnético impulsa el imán permanente en la rotación del rotor y luego impulsa la rotación del motor.



Figura 3.3 Motor eléctrico trifásico sin escobillas.

De acuerdo con diferentes formas de hélice, la hélice se divide en hélice de dirección por defecto y hélice de dirección inversa, en la que la fuerza de elevación es generada por una rotación en sentido horario y viceversa. Cuando la hélice gira bajo la influencia de la fuerza de

reacción del aire se puede generar la fuerza de contra-esfuerzo opuesta a la dirección de rotación de la hélice, la hélice de dirección por defecto y el diseño escalonado de la hélice de dirección inversa pueden compensarse mutuamente.

La descripción de estos componentes se hizo para ejemplificar los componentes incluidos en estos dispositivos. Por lo tanto, fue necesario realizar la adaptación de componentes para permitir la obtención de las imágenes y conocer la distancia existente entre la cámara y la zona proyectada. Se hizo la adaptación de un sensor de distancia y servomotores para posicionar el proyector, entre otros componentes que serán descritas a continuación.

3.2 Instrumentación del UAV

El dispositivo que será empleado para aerotransportar el sistema de triangulación para la obtención de topografías de forma remota es un cuadricóptero Walkera Scout X4 (Figura 3.4). El estudio se centra en la adquisición de información utilizando un UAV comercial al cual se le realizaron ciertas adaptaciones para poder aplicar la técnica de reconstrucción tridimensional empleando proyección de luz estructurada.



Figura 3.4 Cuadricóptero Walkera Scout X4.

El diseño del plan de vuelo de este dispositivo es programable usando una aplicación y una tableta de pantalla táctil o teléfono mediante el dispositivo de estación terrestre Bluetooth BT-2401B (Figura 3.5).



Figura 3.5 Dispositivo o módulo de conexión de estación terrestre bluetooth BT-2401B entre tableta de mano y UAV.

Para el control del Scout X4 es usado el transmisor Devo F12E (Figura 3.6) de 12 canales con un enlace descendente de 5.8 GHz con un monitor ajustable de 5 pulgadas incorporado, para obtener una retroalimentación del video en tiempo real durante el vuelo del UAV. El control Devo F12E puede controlar el cardán del movimiento de la cámara el cual es un dispositivo de 3 ejes (3 grados de libertad) controlados con tres ejes por motores sin escobillas, para posicionar la cámara iLook + (Figura 3.7), además la lente de la cámara tiene una gran apertura angular con la capacidad de tomar fotografías de alta calidad, todo controlable desde el transmisor disparado a 30 fps, un sistema de transmisión incorporado de 5.8 GHz al Transmisor Devo F12E.



Figura 3.6 Control Devo F12E.

El Scout X4 es alimentado por una batería LiPo de 6 celdas 22.2 V, 5400 mAh; de la cual, el transmisor, la cámara y el cardán se alimentan.

3.2.1 Unidad de adquisición de imagen

Para la unidad de adquisición de datos, se utilizó una cámara de sensor semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS) de la marca Walkera® modelo iLook+ (Figura 3.7) la cual es la unidad que viene incluida con su cardán con el drone y tiene las siguientes características:

- Resolución de 4032 x 3024 píxeles.
- Sensor OV4689.
- Tamaño de la imagen 5440 x 3072 μm .
- Tamaño de pixel 2.0 μm x 2.0 μm .
- Dimensiones: largo 44 mm x ancho 25.5 mm x altura 47 mm.
- Formato de sensor 1/3'.
- Captura imágenes en color.



Figura 3.7 Cámara Walkera® modelo iLook+.

CAPÍTULO IV

ADAPTACIONES AL DISPOSITIVO AÉREO

Uno de los principales retos del proyecto fue lograr adaptar las herramientas necesarias para obtener la óptica de ejes cruzados usada para la proyección de luz estructurada en un drone comercial.

Al drone se le hicieron adaptaciones para que se pudiese implementar la técnica de proyección de luz estructurada. Para corregir el campo de visión de la cámara y operar según los requerimientos planteados se le agregó un telescopio para incrementar la resolución del área de interés. También se diseñó la instrumentación a bordo para la determinación de la altura de vuelo. Además, fue necesario diseñar un proyector miniaturizado para proyectar franjas debido a que los proyectores comerciales son pesados.

4.1 Proyección de patrones

Debido a las características exigidas por la técnica de proyección de franjas, es necesario emplear la proyección de un patrón de franjas binarias. En este caso se vio la necesidad de diseñar un proyector con dimensiones reducidas para adaptarlo al drone.

Para el diseño del proyector se consideró el funcionamiento de una cámara tipo pin-hole, concepto que ha sido estudiado durante más de un siglo. Este tipo de cámara plasma la imagen capturada sobre un material químico fotosensible a la luz ubicado en la pared posterior, paralela a la pared que contiene la abertura tipo pin-hole (ver Figura 4.1). Lo que determina el tamaño de la imagen formada a partir del objeto real es la distancia existente entre la cámara y dicho objeto (distancia objeto) así como la altura de ésta. Análogamente, basándose en el concepto anterior de captura de imágenes usando una cámara pin-hole funciona un proyector de imágenes, donde el objeto que se encuentra al fondo es proyectado y dependiendo de la distancia objeto se forma la imagen de manera proporcional a la distancia imagen. Bajo estos mismos principios funciona un proyector usando lentes tal como es mostrado en la Figura 4.2.

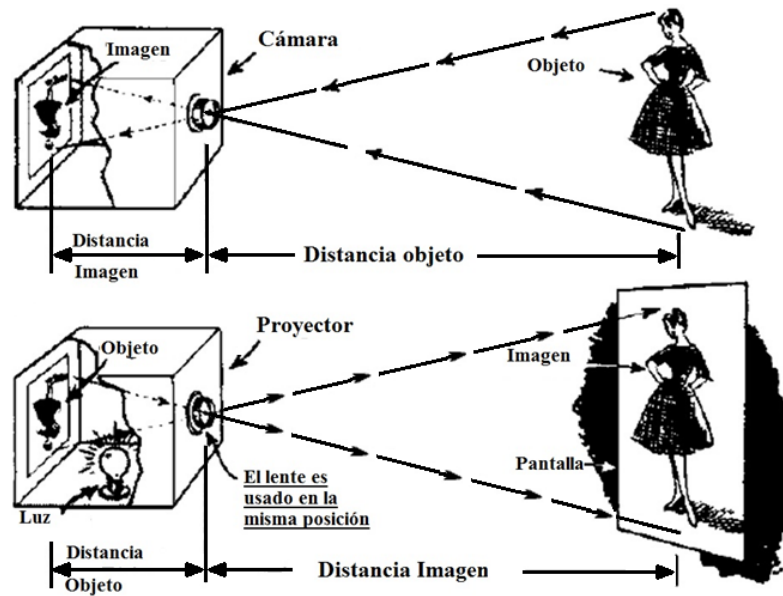


Figura 4.1 Formación de imágenes con una cámara pin-hole y un proyector.

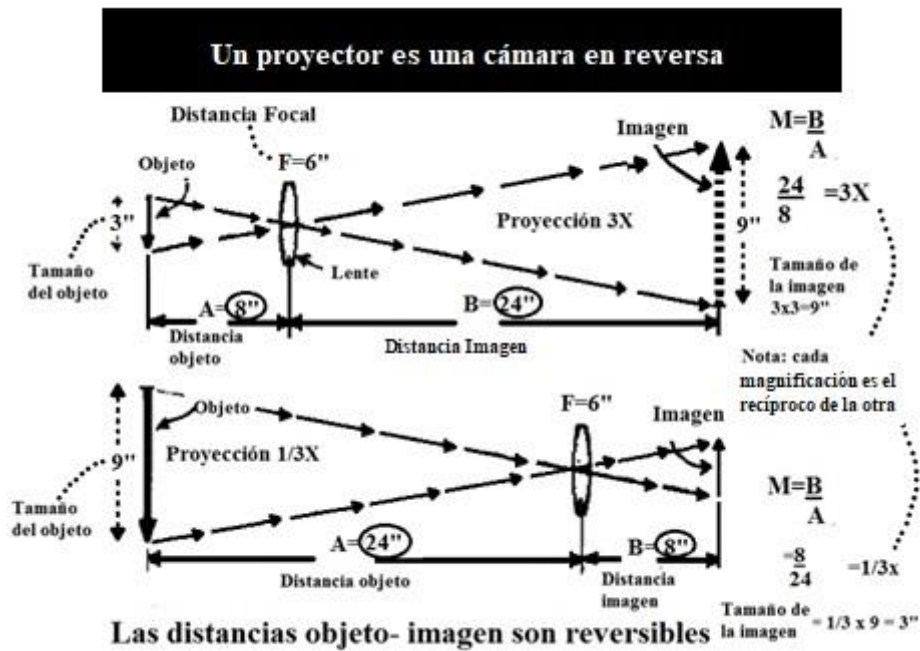


Figura 4.2 Descripción gráfica de un proyector.

4.1.1 Modelado óptico

Debido a que el proyector debe ser ligero y de pequeñas dimensiones, para lograr magnificar una imagen se consideró que la imagen debe encontrarse lo más cercano posible al foco de la lente para que sea magnificada (véase Anexo Figura A.2). Por tal motivo, se buscó una lente la cual tuviese una distancia focal reducida y no distorsionara la imagen por aberraciones de esfericidad. Con las lentes y las dimensiones de los componentes a usar se realizaron los siguientes cálculos para diseñar el proyector. La lente magnificadora es de material BK7 con un índice de refracción de 1.52, tiene un diámetro de 20 mm con sus dos radios de curvatura $r_1=r_2=30$ mm.

La imagen que se desea proyectar es un patrón de franjas, por lo que se optó por usar una rejilla de Ronchi para generar un patrón de franjas. La rejilla de Ronchi es una placa de vidrio delgada en la cual fueron plasmadas una serie de líneas paralelas opacas y transparentes uniformemente intercaladas, conformando en sí una estructura periódica binaria. La rejilla de Ronchi tiene una frecuencia de 50 franjas por pulgada, la rejilla fue cortada de tal forma que fuese fácil adaptarla al diseño compacto del proyector y que concordara con las dimensiones del sistema por lo que su corte consistió en una forma circular de 20 mm de diámetro con un grosor de 2 mm. La lente condensadora también es de material BK7 pero con un diámetro de 12.5 mm y sus radios de curvatura dispares donde $r_1 = 11$ mm y $r_2 = 1$ mm. La primera lente cumple la función de enfocar la luz emitida por el LED sobre la rejilla para contar con un buen contraste.

Usando la ecuación 1.4 del anexo 1 en donde F es la distancia focal de la lente magnificadora y S es la distancia entre el objeto y la lente magnificadora, se puede despejar y obtener la distancia a la cual se forma la imagen de la rejilla Ronchi.

Datos:

$$F = 30\text{ mm}, S = 32\text{ mm} \quad (4.1)$$

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s} \quad (4.2)$$

$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{0.03m} + \frac{1}{-0.032m} \quad (4.3)$$

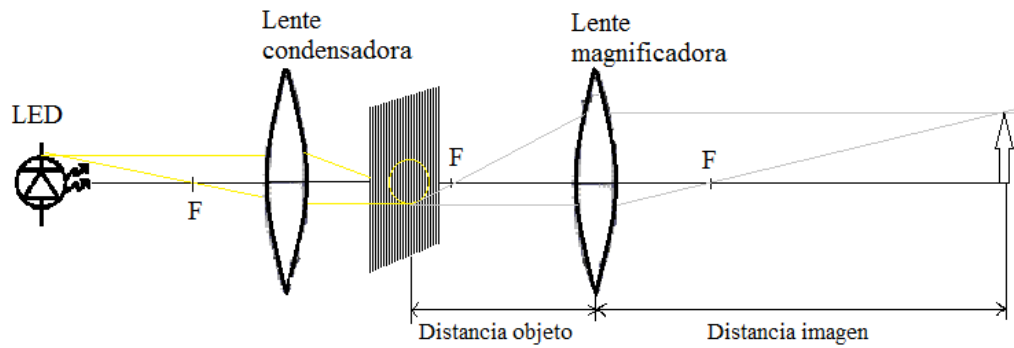


Figura 4.3 Esquema óptico del proyector.

Teniendo el conocimiento de nuestros componentes ópticos y las distancias focales junto con los cálculos de magnificación se pasó a la siguiente fase que es el modelado tridimensional de las piezas para manufacturar el proyector.

4.2 Modelado tridimensional

Para el diseño del proyector fue necesario que este coincidiera con el modelo teórico (Figura 4.3). Se requirió además el modelo tridimensional de las apropiadas monturas para los componentes ópticos. Las piezas tridimensionales fueron diseñadas en el entorno de dibujo SolidWorks y almacenadas en el formato de dibujo *.SLDPRT. En la Figura 4.4 se aprecia el diseño gráfico del proyector.

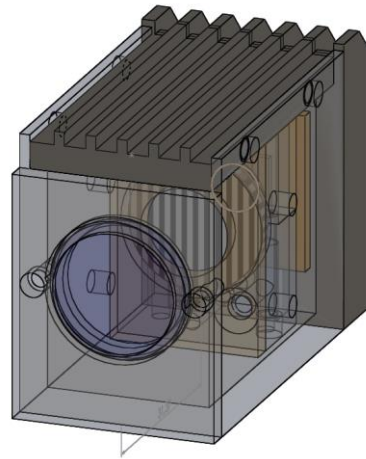


Figura 4.4 Dibujo tridimensional de proyector de franjas en SolidWorks.

Todas las piezas y componentes ópticos también fueron diseñados para hacer un correcto modelado del sistema que coincidiera con el sistema óptico y tuviera el funcionamiento adecuado de acuerdo al diseño. La distancia entre la rejilla de Ronchi y la lente amplificadora fue de 32 mm.

En la Figura 4.5 se muestra la ubicación de las componentes ópticas como se indicó en la Figura 4.3.

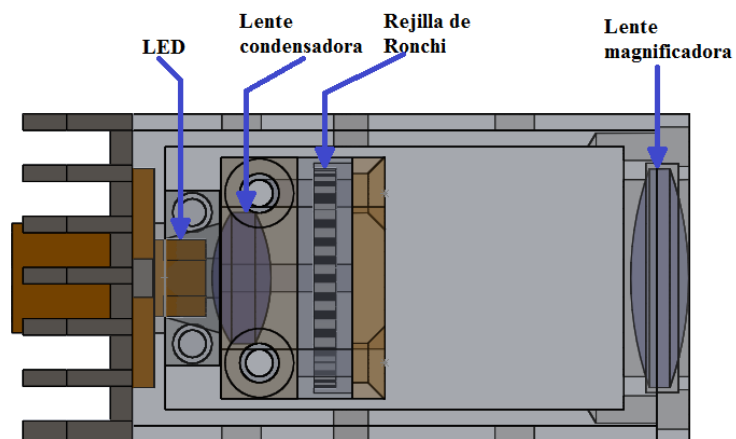


Figura 4.5 Disposición de componentes ópticas en el proyector.

4.3 Impresión tridimensional

Para la construcción del proyector fue necesaria la fabricación de diversas piezas diseñadas de tal forma que resultara sencilla su manufacturado mediante las técnicas de maquinado. Las técnicas de maquinado ofrecen una gran precisión, pero debido el costo de manufactura es demasiado elevado y los materiales ideales para la manufactura son considerablemente densos y pesados, en caso de necesitar nuevas piezas la fabricación se torna demasiado costosa.

La solución a la densidad y peso de los materiales y el costo de manufactura de las piezas fue la utilización de una impresora tridimensional de modelado por deposición de material fundido FDM (*Fused Deposition Modeling*, por sus siglas en inglés), marca Makerbot (la cual es mostrada en la Figura 4.6), que brinda la posibilidad de que al momento de imprimir, extruyendo polímero PLA (poliácido láctico ($(C_3H_4O_2)_n$) [25].



Figura 4.6 Impresora Makerbot Replicator.

Para la fabricación del prototipo mediante la Impresora Makerbot Replicator, se generaron archivos CAD a partir de los realizados en SolidWorks. Además, se determinó la densidad de todas las piezas impresas así como la resolución de impresión, considerando que a mayor resolución de impresión mayor precisión se obtendría en las piezas, solo que el tiempo de impresión se incrementa produciendo problemas en las piezas impresas aumentando el riesgo de tener una impresión fallida. Por lo anterior se procedió a la impresión de las piezas para su posterior ensamblaje, en la Figura 4.7 se pueden observar para el montaje de la lente condensadora y la rejilla de Ronchi.

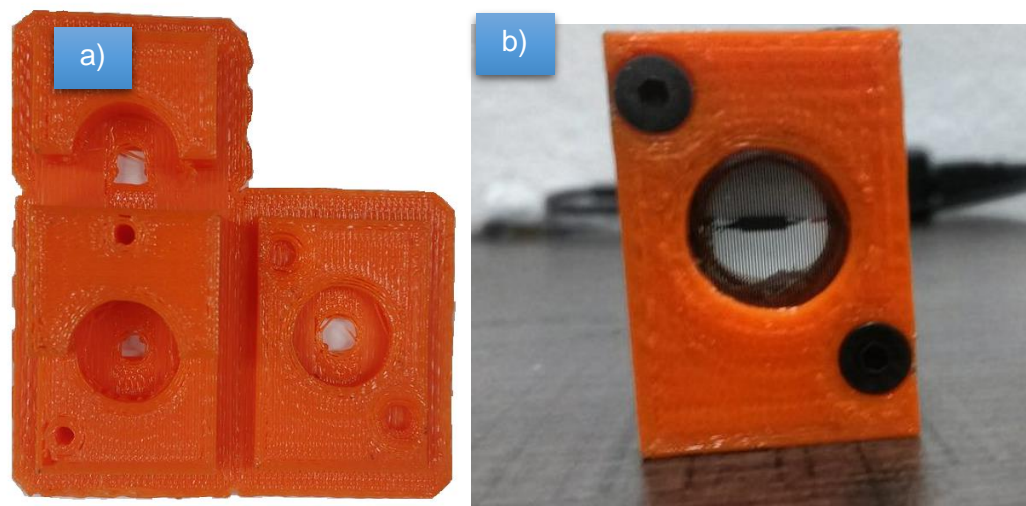


Figura 4.7 Piezas impresas en 3D para el montaje de lente condensadora y rejilla de Ronchi. a) Sin lente condensadora ensamblada b) Con rejilla Ronchi ensamblada.

Posteriormente las piezas son ensambladas con la lente condensadora y la rejilla de Ronchi. Es necesario aclarar que fue necesario hacerlos roscado para la tornillería, debido a que la impresora no cuenta con la suficiente precisión para hacerlo. En la Figura 4.8 se aprecia el proyector con los diferentes laterales de los soportes (monturas) de la lente condensadora y la rejilla de Ronchi.

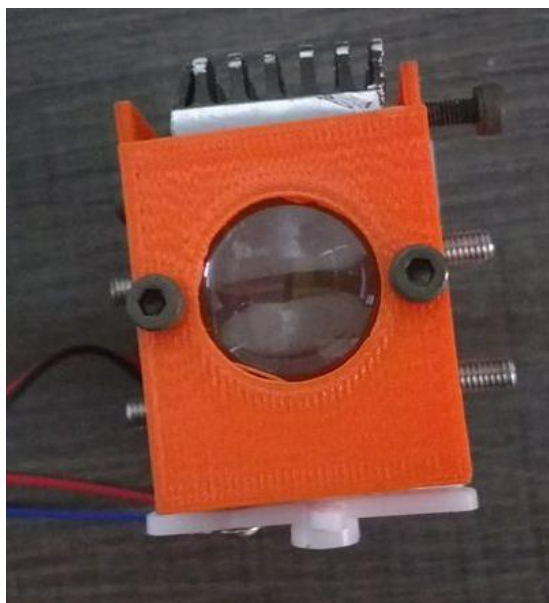


Figura 4.8 Proyector ensamblado.

4.4 Iluminación

Para lograr un gran contraste en las franjas fue necesario contar con una fuente de iluminación que proporcionara un gran volumen luminoso. Se eligió 1 LED de alta potencia fabricado por CREE Inc., de la serie XLAMP que emite luz blanca, con configuración de voltaje de alimentación de 6 V y 2.1^a. Las dimensiones físicas del dispositivo son de 7 mm x 7 mm x 4.49 mm y la forma del lente es una semiesfera con un peso de 300 mg (Figura 4.9) [26].

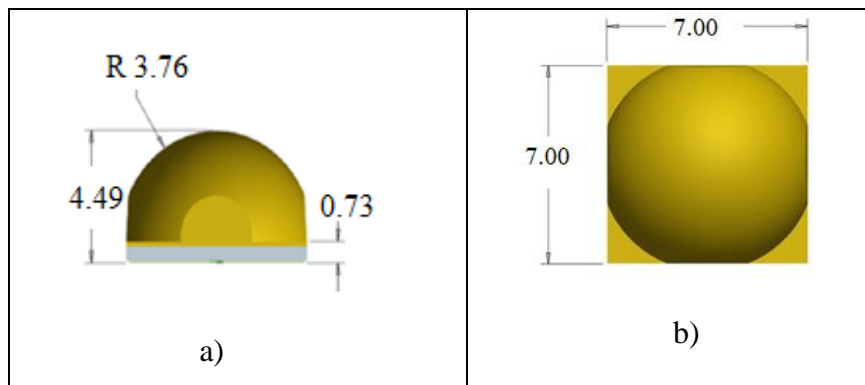


Figura 4.9 Dimensiones del LED (a) vista lateral y (b) vista superior.

Debido a que el LED es de montaje superficial fue necesario montarlo en una tablilla para hacer sus debidas conexiones al circuito electrónico y ésta última fue montada en una placa disipadora de calor la cual es mostrada en la Figura 4.11 [26].

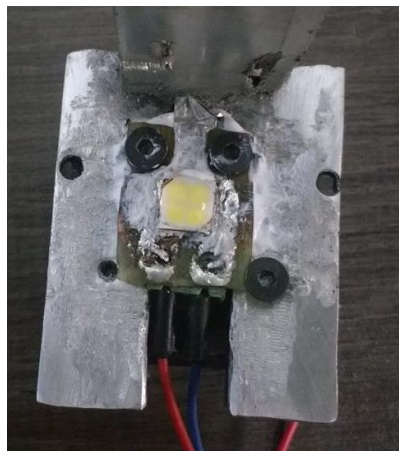


Figura 4.10 LED montado en tablilla, sobre la placa disipadora de calor.

4.4.1 Disipación de calor

Es bien conocido que la tecnología LED desperdicia una importante cantidad de energía en forma calorífica, regularmente esto es imperceptible con LEDs de baja luminiscencia. Debido al requerimiento de un alto flujo luminoso por parte del proyector fue requerido un LED de ultra alta potencia lo que se traduce en la emisión de altas cantidades de calor y este calor debe ser disipado para no dañar dicho dispositivo luminoso.

Fue necesario considerar una tablilla que permitiera realizar las conexiones eléctricas, necesarias y por otro lado asegurar una adecuada transferencia de calor para que éste pudiera ser disipado. Hay muchos tipos de refrigeración activa, entre los cuales está la refrigeración usando ventiladores, refrigeración líquida, enfriado por tuberías calientes, entre otros métodos. La eficacia, la fiabilidad, el ruido y el costo extra de potencia son importantes de considerar en un sistema (lo que se traduce en una menor eficiencia del sistema) y debe pensarse por lo tanto en el mantenimiento de estos dispositivos [27].

En base a la información adquirida se determinó que la forma más conveniente de disipar el calor generado por el LED, fue usando la configuración de tipo Fregadero-Ventilador. Este tipo de disipadores es comúnmente visto en tarjetas de video y procesadores de computadoras, un ejemplo es mostrado en la Figura 4.11.



Figura 4.11 Disipador de calor de un procesador de computadora.

Para adaptar el disipador de calor al LED fue usada una pieza de aluminio obtenida de una tarjeta de video, compuesta de una aleación de aluminio que permite obtener una mayor conductividad térmica. La pieza de aluminio fue adaptada para tener un contacto adecuado con

el LED y que el calor pudiera pasar a través de la tablilla en donde fue montado el LED con sus conexiones junto con los otros componentes electrónicos. Para maximizar la zona de contacto entre el LED y el disipador de calor fue necesario usar pasta conductora de calor para favorecer una adecuada transferencia de calor, evitando el incremento de la temperatura del dispositivo mediante el paso del aire lo cual es mostrado en la Figura 4.10. De lo que se concluye que la carga térmica de un sistema de LED es demasiado alta para ser debidamente disipada por medios pasivos, por lo que la refrigeración activa fue la solución. Al momento de escoger un dispositivo de refrigeración activo que ayudara a otro pasivo se optó por un ventilador de DC sin escobillas alimentado con 12 VDC con un consumo de 0.9 W, un ejemplo del cual es mostrado en la Figura 4.12.

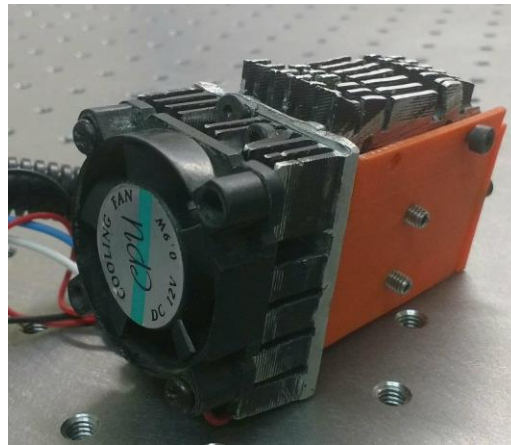


Figura 4.12 Ventilador de 12 V sin escobillas acoplado a placa disipadora.

4.4.2 Alimentación

Para el sistema de alimentación se eligió una alimentación independiente a la del UAV, de tal forma que se usaron un par de baterías de 3.7 V, 2100 mAh de Iones de Litio (Li-ion) colocadas en serie para lograr suministrar 7.4 V. Debido a que el ventilador del proyector requería 12 V, de alimentación, se tuvo la necesidad de usar un elevador de voltaje (Step-Up Boost) logrando este elevar el voltaje a 12 V y poder alimentar el ventilador. El dispositivo Step-Up Boost seleccionado está basado en el circuito integrado LM2577 el cual ayudado con circuitería externa puede realizar esta función. Existen tarjetas desarrolladas listas para ser usadas en aplicaciones

electrónicas de tal forma que resulta fácil conectarlas para realizar su implementación práctica. En la Figura 4.13 se muestra la tablilla desarrollada con el circuito del LM2577S.



Figura 4.13 Step-Up basado en el LM2577S.

4.4 Adecuación de campo visual de la cámara

La unidad de captura de imagen con la cámara +iLook cuenta con un campo de visión amplio de alta resolución para aplicaciones como la fotogrametría o estructura por movimiento. Debido a la naturaleza de la aplicación del uso de un proyector, la región iluminada por el proyector corresponde a la región de interés. Con la cámara en su configuración de fábrica, se captaba la información de la zona de interés en una pequeña región de su sensor CMOS, de tal forma que la resolución de la imagen en la región de interés era muy pobre, y como resultado las imágenes no contenían una resolución aceptable para realizar su procesamiento y obtener una representación del área de estudio. Para hacer mejor uso de la resolución de la cámara, se adaptó un arreglo óptico no invasivo. En la Figura 4.14, se muestra la adaptación a la cámara de una lente de magnificación óptica para teléfonos móviles, que cuenta con un zoom óptico de hasta 8X con una apertura F1.1 y con una distancia focal mínima de 3 metros, el sistema de lentes que lo compone es de forma cilíndrica de 3 cm de diámetro y 7 cm de largo.



Figura 4.14 Lente de Magnificación acoplada.

Debido a que este componente está diseñado para ser adaptado a teléfonos celulares, no existe un adaptador especializado para ser adaptado a la cámara +iLook con la que viene equipada el dron. Por lo tanto, fue necesario hacer una adaptación del zoom óptico, mediante el diseño de una montura con la ayuda del software SolidWorks para adaptar la componente óptica a la cámara del dron. Para hacer más sencilla la adaptación y la edición de las componentes fueron dibujadas sus partes de manera individual para lograr una correcta visualización de la adaptación de las piezas. En la Figura 4.15 se muestra el modelo tridimensional fotorrealístico de la cámara con sus respectivas adaptaciones que corresponden a broches de acoplamiento y al telescopio (modelos basados en las Figuras 4.13 y 4.14).

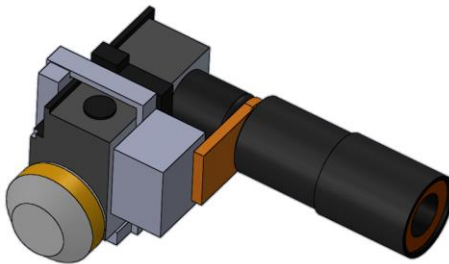


Figura 4.15 Modelo tridimensional de la cámara +iLook con sus respectivas adaptaciones.

En la Figura 4.15 se puede apreciar el modelo tridimensional hecho en SolidWorks el cual es dimensionalmente cercano al modelo original, las partes de color gris se diseñaron de tal forma que se pudiera adaptar la rosca del telescopio. Las piezas diseñadas al igual que la fabricación del proyector de franjas fueron construidas usando la tecnología de impresión tridimensional por deposición de filamento caliente. Las piezas impresas se pueden apreciar en la Figura 4.16.

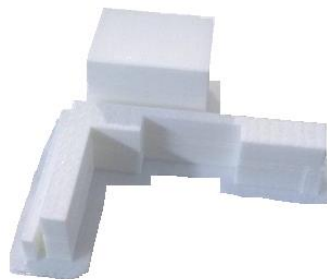


Figura 4.16 Broches fabricados mediante impresión en 3D.

Posteriormente las piezas fabricadas mostradas en la Figura 4.16 fueron montadas de tal forma que se pudo acoplar el telescopio a la cámara como se muestra en la Figura 4.17. De esta manera se demostró que el modelo fotorrealístico generado en SolidWorks (Figura 4.15) guarda bastante similitud al modelo real mostrado en la Figura 4.17.

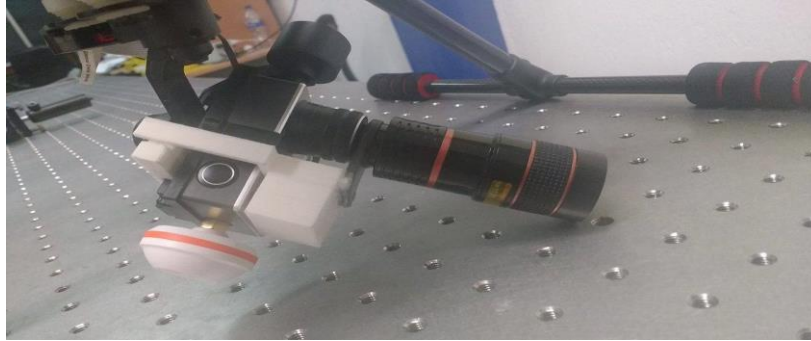


Figura 4.17 Cámara +iLook con sus adaptaciones pertinentes.

CAPÍTULO V

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL APLICADO

La adaptación de componentes, fabricación y diseño de componentes para el drone se apreciaron desde el capítulo anterior, a su vez éste capítulo para la realización de la técnica, requiere del diseño y la adaptación de componentes electrónicos para la integración de información.

5.1 Microcontrolador

El microcontrolador es un dispositivo que permite la comunicación entre dispositivos periféricos tales como sensores y actuadores.

Dicha información es procesada por un módulo central o CPU (*Central Processing Unit*) que es la encargada de realizar los cálculos necesarios para la salida deseada. Este tipo de sistemas utilizan un microprocesador, microcontrolador, FPGA (*Field Programmable Gate Array*) o DSP (*Procesador Digital de Señales*) debido a la flexibilidad que tienen para adaptarse a diferentes tareas, además de ser programados en lenguaje de alto nivel, permitiendo una mayor facilidad para su uso en general.

Generalmente los dispositivos del tipo microprocesador son alojados en chips que incluyen básicamente la CPU y circuiterías relacionadas con los buses de datos y memoria. Para poder realizar su tarea se necesitan de chips externos adicionales para incorporar lo que se conoce como sistema mínimo, tales como memoria, circuitos de entrada salida E/S (I/O) y reloj. Usualmente son usados microcontroladores de 4, o hasta 32 bits, los cuales son dispositivos que albergan un sistema mínimo dentro de un único chip el cual incluye una CPU, así como buses, reloj, memoria ROM, memoria RAM, puertos de Entrada/Salida (E/S) y otros periféricos tales como convertidores analógicos/digitales.

El módulo ESP8266 es un dispositivo que se seleccionó con el propósito de tener una unidad de microcontrolador y comunicación integrada. Este módulo cuenta con la función de poder

realizar lecturas de sensores y activación de actuadores que estén conectados al módulo y los comandos para la interacción con el sistema incrustado son transmitidos a través de WiFi. El dispositivo ESP8266 es un SOC (Sistem On Chip) contando con un alto grado de integración, siendo superior a los demás chips de WiFi, el cual integra un MCU (por sus siglas en inglés de *microcontroller unit*) de 32 bits, con diversos módulos basados en circuitos de señal digital, señal analógica y mixtos (En la Figura 5.1 se muestra la arquitectura interna del ESP8266) [28].

El dispositivo en sí es una solución para realizar conexiones inalámbricas mediante WiFi bajo el estándar IEEE 802.11b y puede realizar las comunicaciones siendo éste el anfitrión de la aplicación del dispositivo o en todo caso, utilizar todas las aplicaciones de red desde otro dispositivo de procesamiento externo. Para este dispositivo fue desarrollado un firmware basado en C ++. Este núcleo permite que la CPU ESP8266 y sus componentes WiFi por protocolo TCP/IP, sean programados como cualquier otro dispositivo Arduino [29].

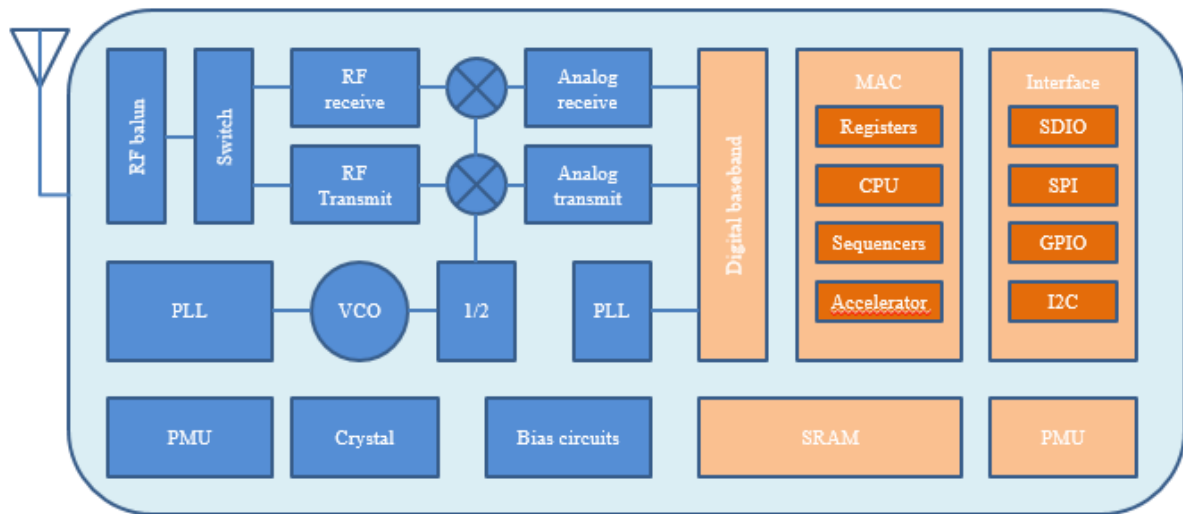


Figura 5.1 Diagrama a bloques de la arquitectura interna del ESP8266.

Al igual que con Arduino, existen variedades en las tarjetas basadas en el ESP8266. El fabricante AI-Thinker proporciona la serie ESP con diferentes modelos para diferentes usos [30]. Han ido surgiendo diferentes placas que incorporan algún módulo ESP como el NodeMCU (Figura 5.2) o el Wemos D1 [31]. El voltaje de alimentación del ESP8266 es de 3 v y es necesario tener un puerto para una fácil programación del dispositivo. Para ahorrar trabajo se escogió el NodeMCU que incluye un adaptador serie/USB y se alimenta a través del microusb. Está basado

en el ESP-12 y cuenta con el acceso a 11 puertos GPIO de los cuales, uno es analógico con una resolución de 10-bit.



Figura 5.2 ESP8266 en tarjeta NodeMCU.

El ESP8266 funciona adecuadamente con el IDE (por las siglas en inglés *Integrated Development Environment*) de Arduino. Cualquiera de los pines GPIO (Entrada/Salida de Propósito General, por sus siglas en inglés *General Purpose Input/Output*) se puede configurar para ser PWM, usar hardware PWM (*Pulse-Width Modulation*, del inglés) en cualquier pin hace que el ESP8266 sea muy flexible. En la Figura 5.3 se puede apreciar el GPIO de la tarjeta NodeMCU. Otra de las capacidades del ESP8266, es que cuenta con la comunicación I2C. El NodeMCU identifica GPIO "4" y "5" como su puerto I2C. Gracias al IDE de Arduino, cuenta con una librería que permite la comunicación I2C de una forma sencilla.

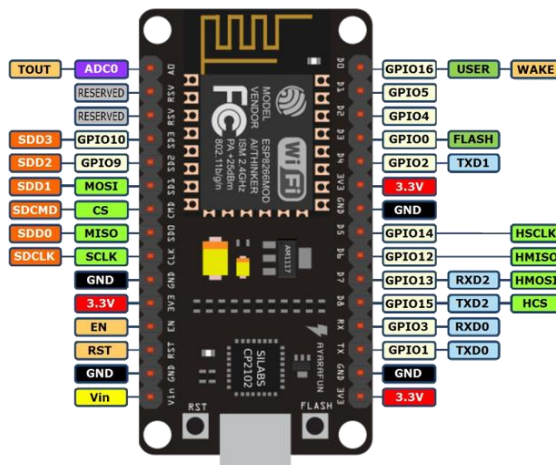


Figura 5.3 Pin out del NodeMCU.

En la Figura 5.3 se pueden apreciar las diferentes salidas del NodeMCU, y que tiene comunicación I2C y PWM que son útiles para comunicarse con los sensores MPL3115A2 y MAXBOTIX EZ-03 respectivamente [32, 33].

5.2 Protocolo TCP/IP

En los protocolos de comunicación, el conjunto de reglas rige el intercambio de información. El modelo TCP/IP describe un conjunto de guías generales de diseño e implementación de protocolos de red específicos para permitir que un equipo pueda comunicarse en una red. Este modelo provee conectividad de extremo a extremo especificando como los datos deberían ser formateados, direccionados, transmitidos, enrutados y recibidos por el destinatario.

La importancia del modelo TCP/IP radica en que es el modelo usado para acceder a Internet o a redes internas (Intranet) de ordenadores. Arduino va a permitir conectarse a Internet o a una red interna mediante TCP/IP para realizar múltiples operaciones o usarse como pasarela para conectar a Internet dispositivos que no tienen esa capacidad. La implementación de la pila de protocolos de TCP/IP en Arduino se hace mediante un shield o HW adicional que da la capa de acceso a red (Ethernet o WiFi), internet (IP) y transporte. La capa de aplicación debe ser implementada dentro de Arduino ya sea directamente o mediante una librería.

En el caso del protocolo TCP/IP la pila OSI se simplifica, ver Figura 5.4:

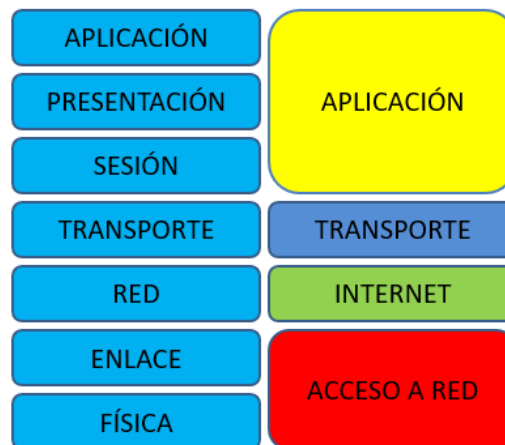


Figura 5.4 Etapas usadas para la comunicación TCP/IP.

Tabla 5.1 Capas del protocolo TCP/IP.

Capa de Aplicación.	Invoca programas que acceden servicios en la red. Interactúan con uno o más protocolos de transporte para enviar o recibir datos, en forma de mensajes o bien en forma de flujos de bytes.
Capa de Transporte.	Provee comunicación de extremo a extremo desde un programa de aplicación a otro. Regula el flujo de información. Puede proveer un transporte confiable asegurándose que los datos lleguen sin errores y en la secuencia correcta. Coordina a múltiples aplicaciones que se encuentren interactuando con la red simultáneamente de tal manera que los datos que envíe una aplicación sean recibidos correctamente por la aplicación remota, esto lo hace añadiendo identificadores de cada una de las aplicaciones. Realiza además una verificación por suma, para asegurar que la información no sufrió alteraciones durante su transmisión.
Capa de Internet.	Controla la comunicación entre un equipo y otro, decide qué rutas deben seguir los paquetes de información para alcanzar su destino. Conformar los paquetes IP que serán enviados por la capa inferior. Desencapsula los paquetes recibidos pasando a la capa superior la información dirigida a una aplicación.
Capa de Interfaz de Red.	Emite al medio físico los flujos de bit's y recibe los que de él provengan. Consiste en los manejadores de los dispositivos que se conectan al medio de transmisión.

TCP/IP utiliza un identificador denominado dirección internet o dirección IP, cuya longitud es de 32 bytes. La dirección IP identifica tanto a la red a la que pertenece una computadora como a ella misma dentro de dicha red [33, 34].

5.3 Sensor de distancia

Para obtener una medición desde el drone al objeto se optó por la utilización de sensores ultrasónicos para determinar la distancia al objeto. La medición ultrasónica de distancia es un método de detección sin contacto, la medición no es afectada por la luz o el color de la superficie del objeto. Tiene una cierta capacidad de adaptación a la oscuridad, el polvo, el humo y la

interferencia electromagnética, lo que la hace ideal para entornos no controlados. Los sensores ultrasónicos trabajan en base a pulsos ultrasónicos y su principio de funcionamiento se ve reflejado en la Figura 5.5. Los sensores ultrasónicos realizan sus mediciones a partir de la evaluación del tiempo en que la onda sónica realiza el trayecto entre la transmisión y recepción. El tiempo que tarda el eco en regresar al receptor es medido y relacionado a una distancia.

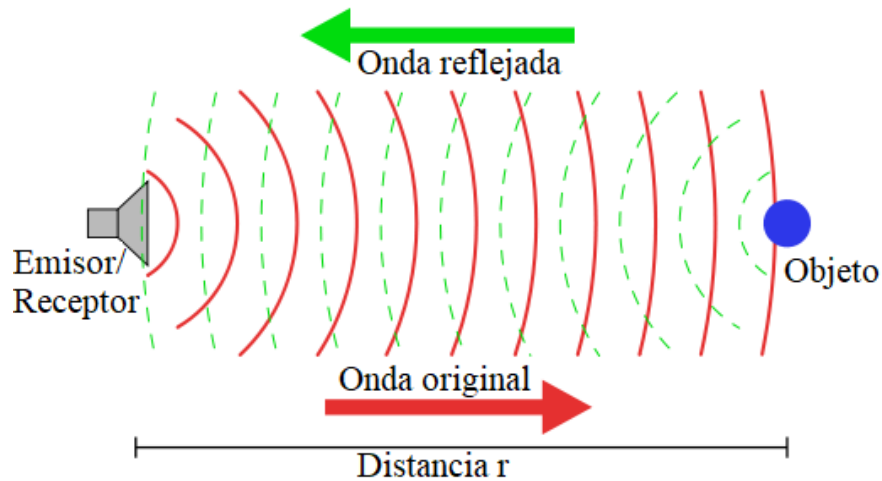


Figura 5.5 Principio de funcionamiento de los sensores de ultrasonido.

Los pulsos de ultrasonido son vibraciones mecánicas de la misma naturaleza que el sonido audible, pero con la cualidad de que poseen una frecuencia mayor a 20 KHz. En la Figura 5.6 se puede apreciar la diferencia existente entre ondas de alta y de baja frecuencia, de tal forma que el oído humano no cuenta con la capacidad de percibir las vibraciones ultrasónicas. En su naturaleza los ultrasonidos cuentan con longitudes de onda muy cortas por lo que éstas pueden ser emitidas y reflejadas por objetos pequeños.

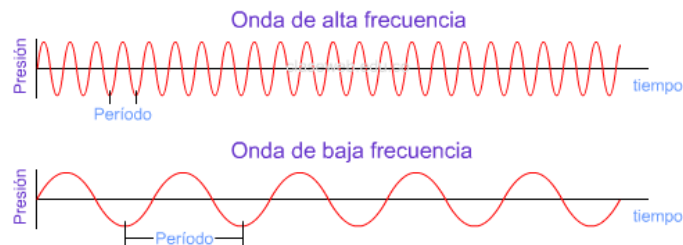


Figura 5.6 Diferencia entre alta y baja frecuencia.

Los dispositivos ultrasónicos cuentan con numerosas aplicaciones orientadas a la medición entre las que destacan: obtención de imágenes de estructuras (ecografías) en aplicaciones

médicas, de estudio de materiales, sistemas de análisis submarinos (SONAR) o atmosféricos (SODAR) [35-36].

Existen diversos sensores de distancia disponibles para ser adaptados a sistemas incrustados, pero revisando hojas de datos, el sensor de ultrasonido con mejores características fue el sensor ultrasónico MAXBOTIX EZ-03 (Figura 5.7). Este sensor tiene ventajas como resistencia al ruido ambiental, rango largo (hasta 6 metros de distancia), calibración automática en tiempo real, con una resolución de 1 cm, bajo consumo de energía, rango de medición estable, puede operar con dispositivos de 3.3 V y 5 V y con diversos tipos de interfaces. El sensor puede trabajar con comunicación RS232, por voltaje analógico y por modulación de ancho de pulso (PWM) [37].



Figura 5.7 Sensor ultrasónico MAXBOTIX EZ-03.

El sensor ultrasónico es conectado al microcontrolador a través de *PWM*. El ancho de pulso es usado para que el microcontrolador mida el tiempo entre los pulsos en alto y en bajo, esta técnica es empleada para realizar el control de posición de servomotores. Sabiendo que el ciclo de trabajo aumenta cuando mayor sea la distancia que exista entre un objeto y el sensor, se determinará la distancia gracias a la relación entre el ciclo de trabajo y el tiempo, se puede determinar la distancia, De la hoja de datos se tiene que la relación matemática es que hay 58 μs por centímetro tal como se muestra en la ecuación 5.1 [38].

$$\text{Distancia} = \frac{\text{Duración}}{58 \mu s} \quad (5.1)$$

5.4 Altímetro

Para la determinación de la información de altitud relativa con respecto al nivel del mar se implementó tecnología MEMS que consiste en un barómetro. Este dispositivo es fabricado por FREESCALE SEMICONDUCTORS MPL3115A2 (Figura 5.8), trabaja con voltajes lógicos de

3.3 V y puede realizar comunicación con una red incrustada a través del protocolo I2C [39, 40].

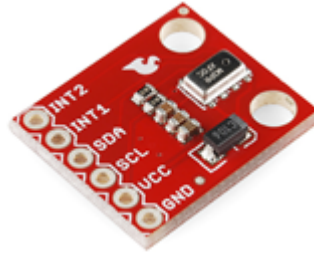


Figura 5.8 Sensor de altitud MPL3115A2.

El altímetro está soldado a una tablilla adaptada para realizar más fácil su conexión a los circuitos debido a que es un dispositivo de montaje superficial, por lo que se torna complicado ser soldado usando técnicas de soldado convencional. La tablilla en la que es adaptada el sensor es fabricada por Sparkfun Electronics, que también suministra una librería con las funciones para trabajar con Arduino, que estén basadas en chip AVR (Microcontrolador desarrollado por Atmel) de forma sencilla. Partiendo del hecho de que la librería fue escrita para microcontroladores basados en AVR es que el código no se puede adaptar directamente al microcontrolador que se ha empleado, por lo tanto, se tuvo que adaptar el código escrito para el propio AVR y poder trabajar adecuadamente con el ESP8266 [41, 42].

5.5 Electrónica

Como fue descrito en la introducción de este capítulo, el sistema electrónico que adaptado al drone cuenta con su propio suministro de energía que es independiente del drone. Para alimentar el sistema incrustado adaptado fueron usadas baterías de 3.7 V, 2100 mAh de Iones de Litio (Li-ion) colocadas en serie para lograr suministrar 7.4 V. Al LED del proyector de alta emisión de luz blanca, le fue configurada su forma de alimentación de voltaje de 6V y 2.1A (Fig. 4.10). Debido al calentamiento del LED fue necesario adaptar un disipador de calor que incluye un ventilador de DC sin escobillas, el dispositivo se alimenta con 12 VDC con un consumo de 0.9 W como el mostrado en la Figura 4.12. Para alimentar el ventilador con 12 V, se usó un elevador de voltaje. El dispositivo Step-Up Boost basado en el circuito integrado LM2577 fue adaptado,

el cual ayudado con circuitería externa puede realizar su propia función. Existen tarjetas prefabricadas basadas en LM2577 con fácil conexión como la mostrada en la Figura 4.13.

Algunos de los dispositivos trabajan con 5 V por lo que fue necesario implementar un regulador de voltaje para lograr esta demanda, el regulador empleado fue el LM7805 el cual puede regular el voltaje de 7 V a 25 V regulándolos a 5 V, los cuales son usados para alimentar el sensor de ultrasonido, el relevador de control de encendido del proyector y la entrada de voltaje del NodeMCU (placa de desarrollo del ESP8266). La placa de desarrollo cuenta con el regulador AMS1117-3.3 cuyo voltaje de operación va desde los 4.75 V hasta los 12 V arrojando una salida de 3.3 V. Aunque el fabricante de la tarjeta de desarrollo recomienda trabajar con 10 V a la entrada de ésta, los 3.3 V suministrados por la tarjeta sirven para alimentar la circuitería que trabaja con esos niveles de voltaje como es el sensor MPL3115A2. Debido a que el sensor de ultrasonido y el relevador trabajan a niveles de voltaje de 5 V y las GPIO del ESP8266 trabajan a niveles lógicos de 3.3 V, fue necesario incluir en el circuito unos convertidores de voltaje para proteger el dispositivo. Los convertidores de niveles lógicos, están basados en el MOSFET BSS138 y su circuito puede ser observado en la Figura 5.9 (a).

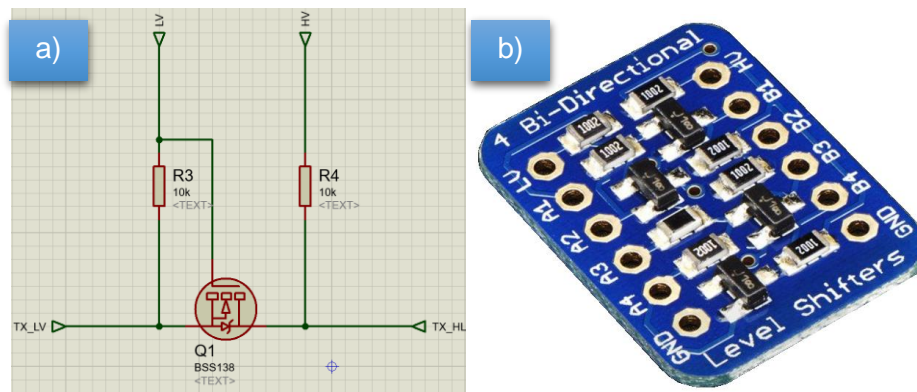


Figura 5.9 Level Shifter. a) Esquemático del Level Shifter, b) Tablilla con 4 Level Shifters.

Los Level Shifter usados fueron diseñados para ser usados mediante un protocolo de comunicación I2C, funcionan bien para trabajar con niveles TTL más lentos, la interfaz puede trabajar tanto unidireccional como bidireccionalmente, viene en una PCB con 4 líneas de convertidor bidireccional la cual se muestra en la Figura 5.9 (b) [43]. Para representar en sí las

conexiones existentes entre los componentes de una forma más concreta, se podrá observar en la Figura 5.10 el diagrama esquemático del circuito electrónico.

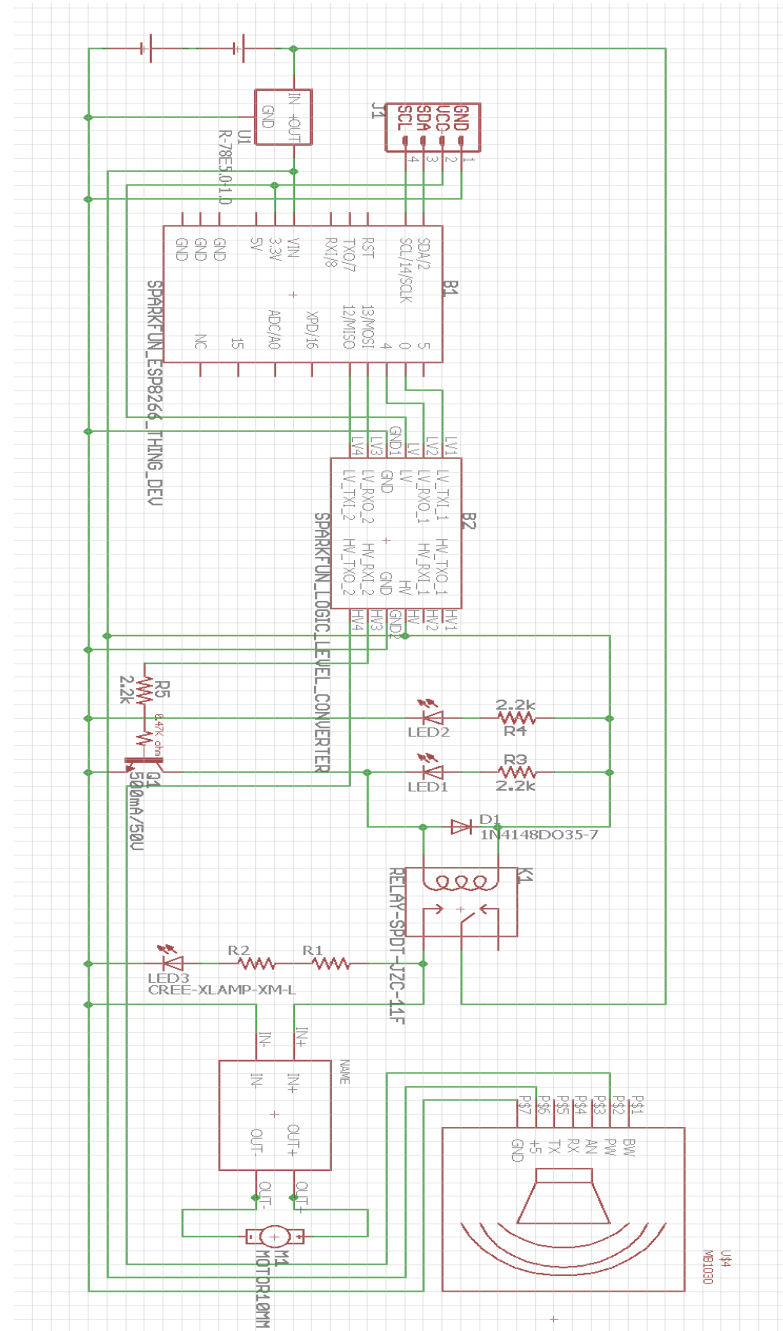


Figura 5.10 Diagrama esquemático del circuito electrónico adaptado al drone.

Para ensamblar el circuito electrónico fue usada una tablilla perforada para adaptar los componentes mostrados en la Figura 5.9, eventualmente fueron soldados para colocar el circuito dentro de una caja fabricada usando impresión en 3D.

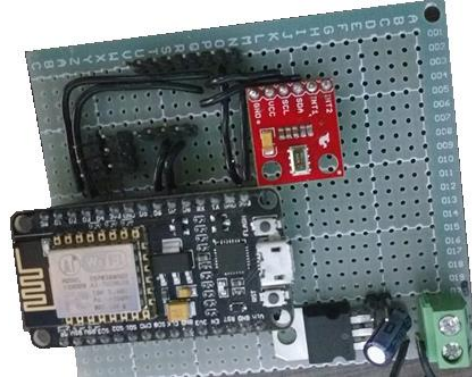


Figura 5.11 Sistema embebido con conectores para conexiones.

5.6 Comunicación inalámbrica

Para la conexión del sistema embebido inalámbricamente fue usada la configuración para WiFi que viene integrada en la tarjeta NodeMCU. El sistema incrustado funciona en base a la configuración mostrada en la Figura 5.12, en donde se muestra la arquitectura cliente-servidor, el cual es un modelo en el que las tareas son realizadas por los servidores que tienen la facultad de proveer recursos o servicios. Los clientes son aquellos que demandan alguna acción al pedir información al servidor pidiendo una respuesta.

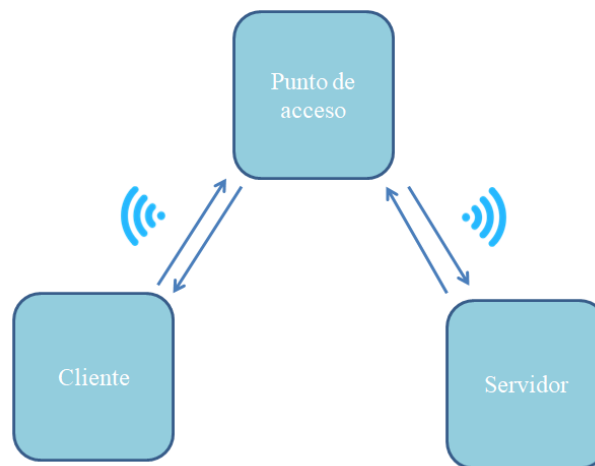


Figura 5.12 Configuración cliente-servidor.

El sistema embebido adaptado al drone es el servidor en base a nuestro esquema de comunicación, fue designado de esa forma debido a que lo que se requiere es que obtenga información y realice una serie de acciones requeridas. Las instrucciones que tiene el sistema embebido fueron previamente programadas para que fuesen realizadas a la hora en que el cliente pida la información requerida. El cliente es una computadora la cual es conectada a la misma red de WiFi a la que se encuentra conectado el servidor, de esta forma los datos adquiridos, eventualmente serán usados para otra tarea. Según el esquema presentado en la Figura 5.10, es necesario tener un punto de acceso que suministre una red que correspondería a la capa física para que la comunicación se lleve a cabo. Como punto de acceso se usó la tarjeta basada en el ESP8266 que funciona de forma similar a la tarjeta NodeMCU, a diferencia de la tarjeta a la cual fue usada como server, esta tarjeta fue programada para que funcionara como punto de acceso lo cual le permite generar una red de área local inalámbrica, también conocida como WLAN (del inglés *wireless local area network*) para interconectar los equipos de comunicación inalámbricos. La red generada por el dispositivo tiene el nombre ESPap, y su conexión a ella se puede observar en la Figura 5.13, a la cual está conectado el cliente de forma inalámbrica.

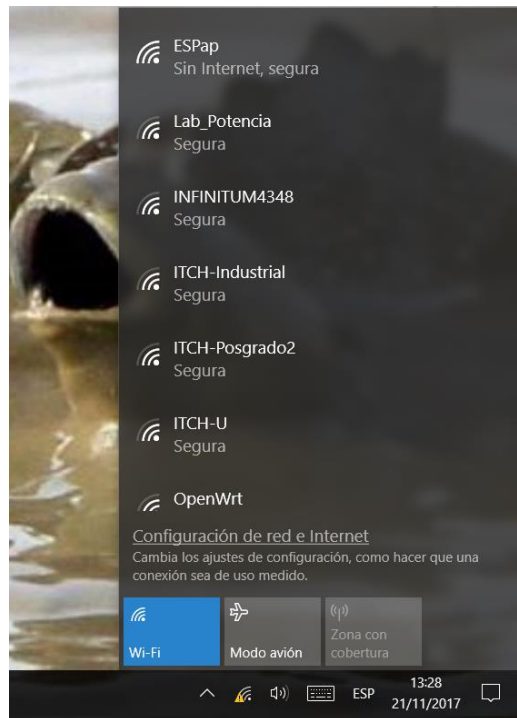


Figura 5.13 Conexión a red generada por el ESP8266.

Para la comprobación de la existencia de la comunicación entre el cliente y el punto de acceso, la dirección IP que se auto asigna se puede apreciar en la Figura 5.14. El punto de acceso asigna automáticamente las direcciones IP de los dispositivos dependiendo del orden en el cual van accediendo. La dirección que se asignó el punto de acceso es la 192.168.4.1 y para acceder al servidor se usó el navegador Google Chrome. Al acceder a esa dirección el cliente muestra en pantalla que ese ha conectado a la red, la dirección que tiene el cliente generalmente es la 192.168.4.2.

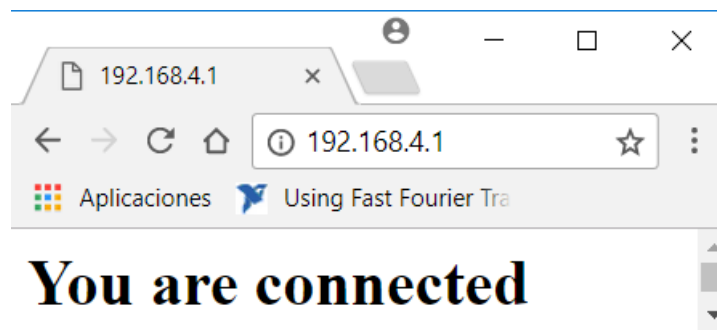


Figura 5.14 Conectividad entre cliente y punto de acceso.

La dirección del nodo al cual se requiere comunicar es la 192.168.4.3 que corresponde al servidor dentro de la red, para que el cliente haga su petición se tiene que dirigir a la dirección del servidor y realizar las peticiones que requiera, las acciones que se le pueden realizar al servidor son las siguientes:

- Activación y desactivación del proyector de franjas.
- Lectura de sensor de altitud (MPL3115A2).
- Lectura del sensor de distancia (Maxbotix EZ-03).

La activación y desactivación del proyector de franjas fue integrada dentro de las actividades que tiene que realizar el servidor, esto es necesario debido al consumo excesivo de potencia por parte del proyector, lo cual no es lo más óptimo para la aplicación ya que se pueden descargar las baterías momentos antes de realizar la toma de fotografías de la zona de interés. El requerimiento hecho por el cliente son valores booleanos para activar o desactivar el proyector,

el servidor activará o desactivará el proyector según la petición y regresará el valor de la operación en la pantalla del cliente tal como se muestra en la Figura 5.15.

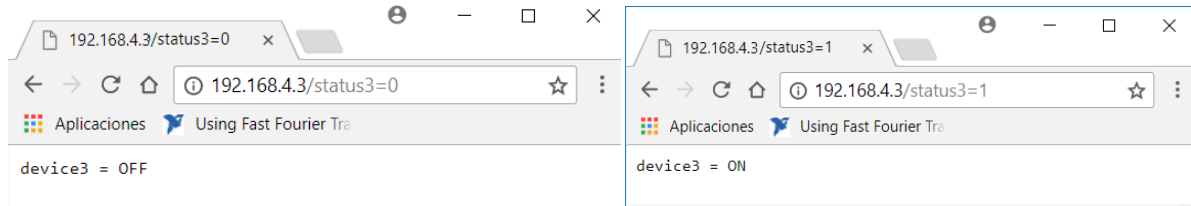


Figura 5.15 Activación y desactivación del proyector de franjas desde el cliente.

Tal como se mencionó anteriormente, fue añadido un altímetro (MPL3115A2) a la circuitería debido a que se puedan presentar situaciones en las que el GPS no entregue rápidamente la información de la altitud relativa con respecto al nivel del drone, por lo que el altímetro fue una herramienta de bajo peso con la que se puede obtener la altitud relativa con respecto al nivel del mar con una precisión de $\pm 0.3048m$, debido a que está basado en un barómetro, el cual también puede sensar la temperatura. Los requerimientos de la información desde el cliente son de la misma forma que en la Figura 5.15, pero éste a su vez cambia la petición y el tipo de datos que entrega el servidor en la pantalla del cliente, los valores de altitud y temperatura nos son entregados en metros y grados centígrados respectivamente.

Para la determinación de alturas tal como exige la técnica de proyección de franjas es necesario conocer la distancia entre la cámara y el proyector. Para conocer la distancia entre la cámara y el objeto es necesario conocer las distancias para la determinación del ángulo de triangulación. Finalmente para conocer las distancias de la cámara a los objetos, se colocó un sensor de ultrasonido al lado de la cámara cumpliendo el arreglo de proyección de franjas tal como se muestra en la Figura 5.16.

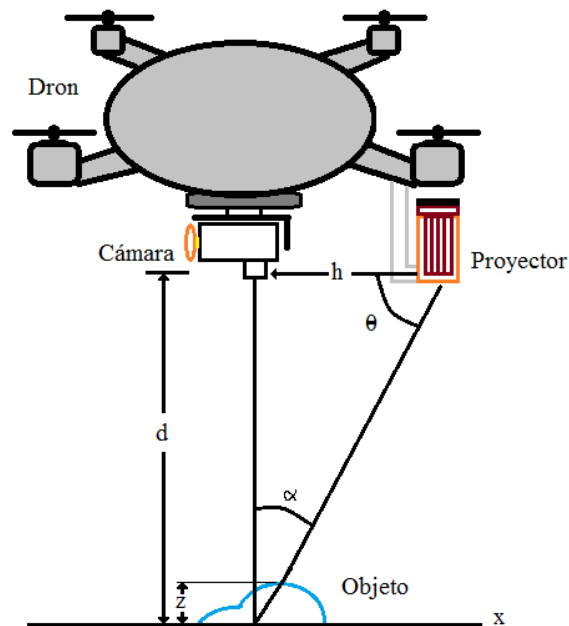


Figura 5.16 Óptica de ejes cruzados para transformada de Fourier en dron.

Para conocer ese dato *in situ* se utiliza la comunicación mostrada en la Figura 5.17, fue necesario usar un sensor de distancia para determinar los valores de las distancias requeridas.

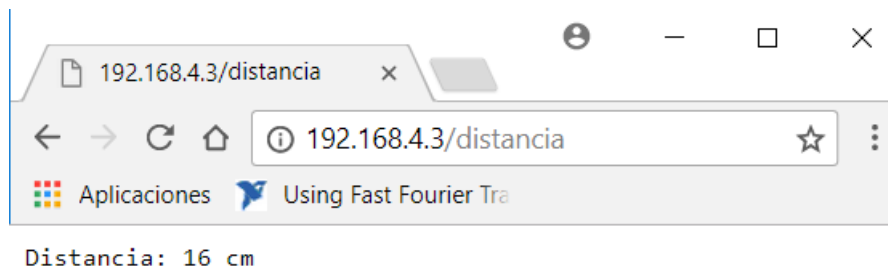


Figura 5.17 Distancia leída del sensor de distancia.

CAPÍTULO VI

PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN Y OBTENCIÓN DE TOPOGRAFÍA

En el capítulo actual se presenta la implementación del algoritmo para la adquisición de topografía usando un drone mediante la adaptación de componentes. Las pruebas de la técnica fueron realizadas en ambientes no controlados para darle una aplicación a la técnica de proyección de franjas fuera de un ambiente de laboratorio y de conocimiento de un plano de referencia conocido.

El proceso para la obtención de topografías, fue realizado de noche cuando la fase lunar no se encontrara cercana a la luna llena. El drone fue colocado sobre el objeto de pruebas en una posición óptima para la captura de la información a la altura a la cual fue caracterizado el sistema, eventualmente el drone fue desplazado a una altura considerada como su "plano de referencia" para eventualmente procesar la información.

6.1 Caracterización de la cámara

Como se mencionó en el capítulo 3, se usó la cámara integrada por default en el drone como unidad de adquisición de imágenes, la cámara modelo iLook+ de Walkera la cual cuenta con las siguientes características:

- Resolución de 4032 x 3024 píxeles.
- Sensor OV4689.
- Tamaño de la imagen 5440 x 3072 μm .
- Tamaño de pixel 2.0 μm x 2.0 μm .
- Dimensiones: largo 44 mm x ancho 25.5 mm x altura 47 mm.
- Formato de sensor 1/3''.
- Captura imágenes en color.



Figura 6.1 Cámara CMOS marca W marca CMOS marca Walkera® modelo ILook+.

Tal como fue mencionado en el capítulo 4 la cámara en su configuración de fábrica desperdiciaba la mayoría de la zona activa del sensor y adquiría la información de la zona de interés CMOS. A la cámara se le adaptó una magnificación óptica de teléfonos móviles, cuyo equipo cuenta con un zoom óptico que le permite tener una magnificación de hasta 8X con una apertura F1.1 con una distancia focal mínima de 3 metros, el sistema de lentes que lo compone es de forma cilíndrica de 3 cm de diámetro y 7 cm de largo el cual se muestra en la Figura 6.2.



Figura 6.2 Lente acoplada.

El campo de visión se define como el área del objeto bajo inspección que el sistema de adquisición captura. El campo de visión puede ser medido tanto horizontal, vertical o diagonalmente. Debido a que las imágenes adquiridas son en general de un área rectangular, es útil realizar el cálculo de campo de visión horizontal (ecuación 6.1) y vertical (ecuación 6.2) para determinar cuál será el área adquirida por la cámara. El campo de visión horizontal se calculó con la siguiente fórmula:

$$HFOV = \frac{h_h * WD}{f} \quad (6.1)$$

Donde:

$HFOV$ = Dimensión horizontal del campo de visión capturado.

h = Dimensión horizontal del sensor (número de píxeles horizontales multiplicado por el tamaño de pixel).

WD = Distancia de trabajo entre la lente y el plano de referencia.

f = Distancia focal.

$$VFOV = \frac{h_v * WD}{f} \quad (6.2)$$

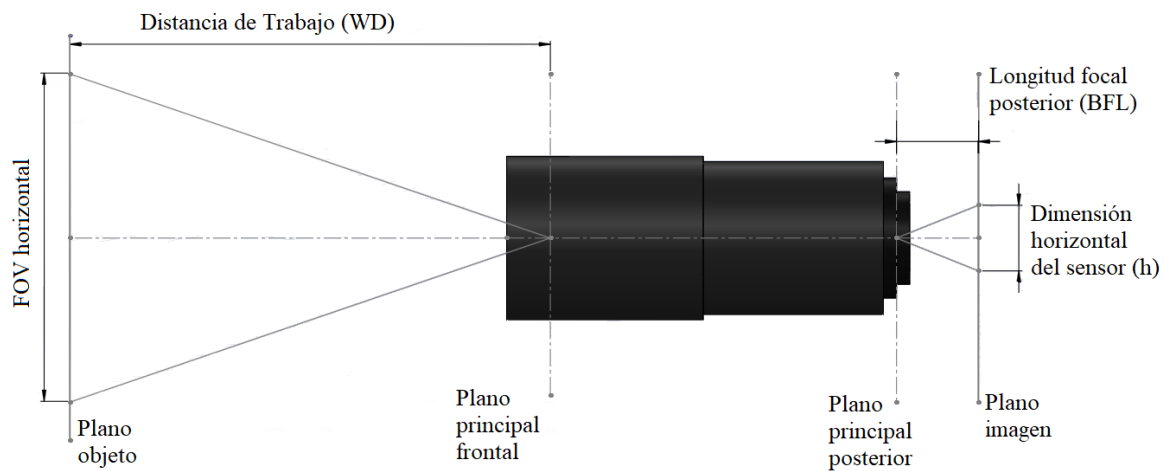


Figura 6.3 Esquemático de planos de prueba de la lente adaptada

ancho y alto del pixel = $2\mu\text{m}$

h horizontal = $4032 \text{ pixels} * 2\mu\text{m} = 8.064\text{E-}03 \text{ m}$

h vertical = $3024 * 2\mu\text{m} = 6.048\text{E-}03 \text{ m}$

WD = 3 m

HFOV=7 m

VFOV=4.15 m

Debido al desconocimiento de la distancia focal del dispositivo, pero conociendo los demás datos se pudo despejar la f de nuestra ecuación. En donde:

$$fh = \frac{hh * WD}{HFOV} \quad (6.3)$$

$$fv = \frac{hh * WD}{VFOV} \quad (6.4)$$

Distancia de trabajo a 3 m con telescopio

HFOV=1.14 m

VFOV=0.82 m

$fh=3.456 \text{ E-}03 \text{ m}$

$fv=4.372 \text{ E-}03 \text{ m}$

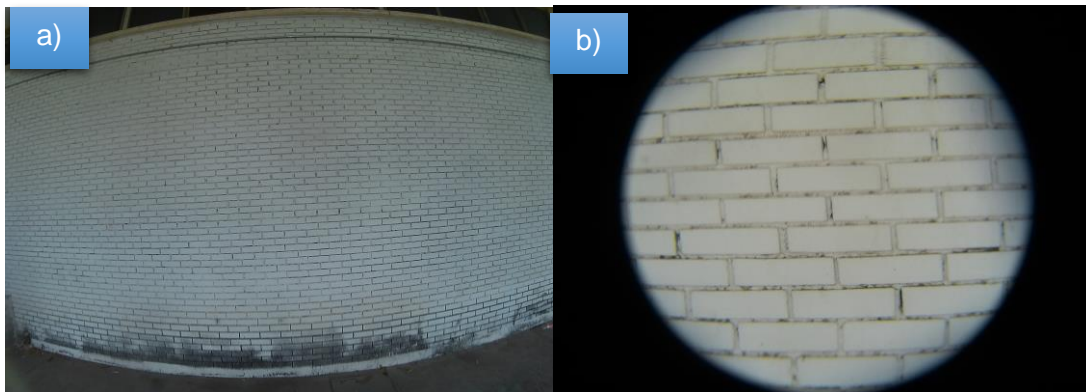


Figura 6.4 Comparación de imágenes capturadas con la cámara del drone. a) Imagen obtenida con la cámara a 3 metros de distancia, b) Imagen obtenida con la cámara con magnificación óptica.

6.2 Algoritmo de reconstrucción

El algoritmo de reconstrucción a utilizar requiere de una imagen para su utilización, en donde a la imagen de trabajo se le proyectaron las franjas a la cual se le hará el tratamiento a la imagen capturada para posteriormente aplicar su respectivo procesamiento.

6.2.1 Conversión a tonos de grises

Para poder realizar la operación de aplicar la transformada de Fourier, es necesario realizar la conversión de la imagen a color de entrada a una en tono de grises, eso se obtiene al cambiar la imagen al equivalente de la luminancia de la imagen. Si bien es sabido que el ojo percibe distintas intensidades de la luz en función del color que este observe, eso es debido a la respuesta del ojo al espectro visible de la luz. La ecuación 6.4 de la luminancia muestra la expresión matemática de ese fenómeno y los factores de ponderación de cada componente de color indican la sensibilidad del ojo humano a las frecuencias del espectro cercanas al rojo, verde y azul. Eso mismo es aplicado al algoritmo para la conversión al plano de la intensidad, el cual toma los valores RGB de la imagen original y los convierte a escala de grises mediante la formación de la suma ponderada de las componentes R, G y B, transformando cada valor de pixel a escala de grises con valores enteros de 8 bits sin signo quedando la información en el plano de la luminancia, generando una nueva paleta en tonos de grises tal como es realizado por el algoritmo bajo la siguiente operación:

$$I = 0.3 * R + 0.59 * G + 0.11 * B \quad (6.5)$$

Como resultado se obtiene una nueva imagen nombrada I. Una vez obtenidos los nuevos valores se realizó una conversión entre tipos de datos, se convierte a una imagen tipo *double* con intervalos de valores de 0 a 1.

6.2.2 Transformada discreta de Fourier

La transformada discreta de Fourier o DFT (del inglés, *Discrete Fourier Transform*) es un tipo de transformada discreta utilizada en el análisis de Fourier cuya propiedad radica en transformar una función matemática en otra en la que se convierte de una señal o función en el dominio espacial o temporal en una función en el dominio de la frecuencia. Pero la DFT requiere que la función de entrada sea una secuencia discreta y de duración finita, para señales bidimensionales se aplica la FFT (*Fast Fourier Transform* del inglés) que calcula la transformada discreta de Fourier (DFT) de la matriz de entrada. La función FFT es una familia específica de algoritmos, que permite la descomposición de la transformada a tratar en otras más

simples realizando cálculos de forma más óptima mediante sistemas computacionales. La funcionalidad de la FFT la realiza en una dimensión en las filas de la matriz de entrada y luego realiza la FFT de una dimensión en las columnas de la salida del paso anterior. La DFT de una matriz $M * N$ se define como:

$$F(u, v) = \sum_{y=0}^{M-1} \sum_{x=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi \frac{yu}{M}} e^{-j2\pi \frac{xv}{N}} \quad (6.6)$$

para $u = 0, 1, \dots, M-1, v = 0, 1, \dots, N-1$

Donde $f(x, y)$ es la matriz de entrada y $F(u, v)$ es el resultado de la transformación. Al realizar el procesamiento se observa que la matriz $F(u, v)$ tiene valores complejos, para visualizar los valores presentes en el espectro con la magnitud $F(u, v)$ desplegándola de forma tridimensional.

6.2.3 Localizar primer armónico

Debido a que la información producida por la deformación del patrón periódico se encuentra en el primer armónico de la señal analizada por la transformada discreta de Fourier, hay que filtrar el primer armónico producido y para llevar la tarea es necesario conocer su posición dentro de la distribución de las frecuencias.

Para ubicar el armónico del que se desea obtener la información y buscar el valor máximo de la matriz en donde se encuentra el espectro el cual es el término DC, posteriormente se procede a la eliminación del valor máximo del centro y de las frecuencias cerca del centro, finalmente se busca un nuevo máximo donde se encuentre la componente fundamental.

6.2.4 Filtrado en el dominio de la frecuencia

Para aplicar el filtrado conociendo la posición en donde se encuentra el valor máximo del armónico y a partir del valor central del armónico se coloca un filtro para aislar la información de la imagen. Se realiza la multiplicación del filtrado de frecuencia f del espectro de Fourier,

para ello el filtro es colocado en la posición en donde se encuentra la frecuencia fundamental para poder aislar la información circundante.

6.3 Plano de prueba

Para la captura de datos fidedigna es necesario tener un plano de referencia como el mostrado en la Figura 5.16 que muestra el arreglo de triangulación que es usado por el drone. La altura de vuelo a la cual el sistema se encuentra calibrado es de 3 m debido a que la frecuencia en las franjas es alta y la intensidad luminosa tiene un alto contraste. Como es descrito por la técnica, existe un ángulo de proyección coincidente entre proyector y la cámara de 10.55° , la forma para obtener el ángulo de triangulación es; $\alpha = \tan^{-1}(h/d)$ en donde h es la distancia entre la cámara y el proyector, y la distancia d está dada por la distancia existente entre el proyector y el plano de referencia. Para obtener la distancia entre la cámara y el plano de referencia es usado el sensor de ultrasonido que se mencionó en el capítulo 5, el cual forma parte de un sistema embebido para poder adquirir la información de distancias para la determinación de altura, el resultado de esta serie de adaptaciones se puede apreciar en la Figura 6.5.



Figura 6.5 Drone Walkera Scout X4, equipado con una cámara iLook + y un pequeño proyector.

Los patrones de franjas deben proyectarse primero en el plano de referencia y luego, en la superficie del objeto, respectivamente, para lograr una alta precisión. Sin embargo, en entornos no controlados, es difícil eliminar e instalar el objeto en el plano de referencia. En este análisis se sugiere introducir artificialmente un plano de referencia, esto implica la calibración de la

altura. En condiciones ideales, el plano del sensor y el plano de referencia están nivelados. Sin embargo, en escenarios bajo condiciones de terreno desigual, un plano de referencia virtual debe elegirse adecuadamente.

Para adquirir imágenes de alta calidad, es importante elegir los parámetros apropiados, como el enfoque y el balance de blancos. En la calibración llevada a cabo, se seleccionó un plano como el objetivo de interés, y se usó como un tablero de calibración para la altura del vuelo. Un pequeño telescopio agregado al sistema con la configuración para enfocar adecuadamente a las franjas proyectadas en una pequeña región de interés, como resultado, las dimensiones del área de terreno visible tienen una longitud de 84 cm y un ancho de 114 cm. La distancia desde la lente de la cámara al plano es de 3 m. Entonces, un análisis del patrón marginal en el campo de visión o FOV puede ayudar a estimar la altitud del drone con respecto al plano de referencia virtual.

En la Figura 6.6 se muestra un terreno desigual, en donde las distancias desde el plano del sensor a los puntos A y B son diferentes. El punto O denota el centro de la imagen. El plan de vuelo con el drone Walkera se planeó a una altitud promedio de 3 m del avión de referencia virtual.

Para calcular la altitud ideal del drone en un terreno desigual, se consideró que el drone vuela sobre el área de interés. Una vez que se ha identificado la posición inicial, la altitud se calcula y se comunica a la computadora de la estación en tierra. Ahora, el drone puede moverse ligeramente hacia la dirección izquierda o derecha respecto del punto principal (O) para determinar la nueva altitud (ver Figura 6.6). Si la altitud ha excedido la altitud permitida, se descarta y la altitud de vuelo disminuye hasta que la nueva altitud coincida con la altura calibrada previamente.

Una vez que la nueva posición no supera la altitud permitida, el drone se mueve a la posición inicial y se registra una imagen aérea. La imagen se envía a la estación base para su posterior procesamiento, y si es necesario se le pueden asignar nuevas tareas al drone.

Entonces, el punto A puede detectarse fácilmente por medio de un desplazamiento $W/2$ respecto al punto principal (O), Aquí, W denota el ancho del área de cobertura (114 cm). Ahora,

en la Figura 6.6 el plano de referencia virtual puede ser $h_{MIN} = d_1 + d_2$, siempre que corresponda a la altura calibrada previamente.

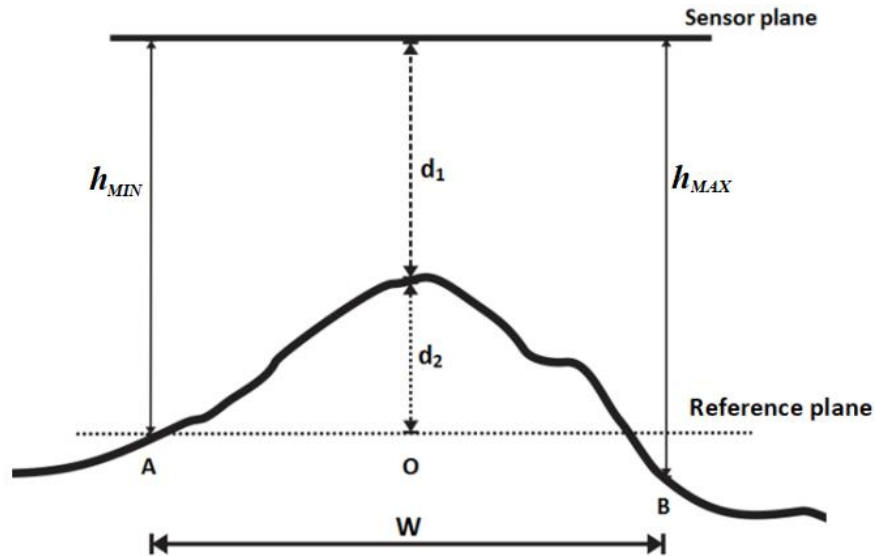


Figura 6.6 Plano de trabajo

CAPÍTULO VII

RESULTADOS

En este trabajo se realizaron mediciones ópticas 3D mediante la combinación de técnicas del perfilometría óptica y vehículo aéreo controlado remotamente. El sistema es básicamente una cámara y un proyector miniaturizado adaptado al drone utilizado en las pruebas. La técnica discutida aquí puede aplicarse para registrar sitios pequeños y generar la topografía con gran detalle.

Los sistemas de proyección de franja para mediciones de superficies 3D han alcanzado un nivel de madurez adecuada en ambientes controlados. Esto ha motivado a implementar esta técnica en dispositivos aéreos en ambiente no controlados para adquirir información de textura detallada en áreas de pequeña escala a una baja altitud de vuelo

Es importante mencionar que en ambientes de laboratorio y al aire libre se presentan diferentes desafíos para una reconstrucción 3D. En este trabajo se analiza la posibilidad de transferir esta técnica de una situación a otra.

Inicialmente se obtuvo la topografía de un objeto en el laboratorio, el arreglo experimental consistió de una cámara y dos proyectores. En una primera etapa se proyectaron franjas con un proyector multimedia comercial y el patrón proyectado sobre la superficie del objeto es registrado por una cámara Thorlabs. En una segunda etapa, se proyectó un patrón de franjas mediante el proyector diseñado en nuestra institución, de igual manera se registra el patrón proyectado sobre la superficie del objeto. Cabe mencionar que los datos obtenidos son con parámetros similares

7.1 Análisis de resultados

El proyector comercial empleado en la primera etapa fue el proyector mostrado en la Figura 7.1 de marca Toshiba®, modelo TDP-FF1 basado en tecnología de proyección DLP (*Digital Light Processing* por sus siglas en inglés), con una lámpara LED de 400 lúmenes de brillo y con una resolución de 800 x 600 píxeles, con un peso de tiene un peso de 565 g, equipado con una batería y lectura de dispositivos Flash.



Figura 7.1 Proyector marca Toshiba® modelo TDP-FF1.

Para la comunicación entre la computadora y el proyector se utilizó un cable VGA, de esta manera el patrón se proyectó de forma automática sobre el objeto de interés, una vez generado el patrón.

Para la unidad de adquisición de datos en condiciones de laboratorio y lograr la comparación de ambos proyectores, se utilizó una cámara de carga acoplada (CCD) de la marca Thorlabs® modelo DCU224C (Figura 7.2), y una lente de alta resolución marca Tamaron® modelo 23FM16 con una distancia focal de 25 mm, con operación de enfoque manual y con una distancia mínima al objeto de 0.21 m.



Figura 7.2 Cámara CCD marca Thorlabs® modelo DCU224C acoplada con una lente marca Tamaron® modelo 23FM16.

La cámara utilizada cuenta con una resolución de 1280 x 1024 píxeles. El propósito es mostrar que usando un proyector diseñado con óptica simple bajo condiciones similares (parámetros) se obtienen resultados aceptables. Para hacer el comparativo de la reconstrucción en ambos proyectores con distancias y ángulo de proyección para realizar el comparativo en cuanto a la forma del objeto tal como es mostrado en la Figura 7.3.



Figura 7.3 Arreglo experimental en condiciones de laboratorio.

En la Figura 7.4, se muestran las imágenes con los patrones proyectados sobre la superficie del objeto bajo prueba por los proyectores implementados en la configuración mostrada en la Figura 7.3.

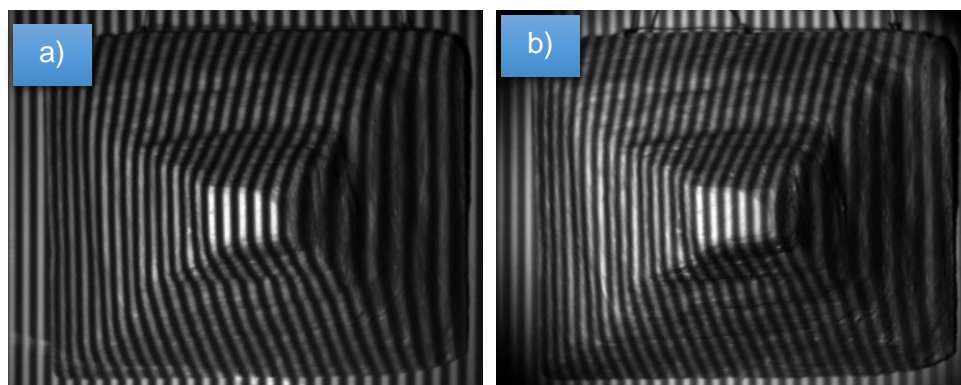


Figura 7.4 Proyección de franjas en ambiente controlado a) Usando proyector comercial, b) Usando proyector óptico propuesto.

Posteriormente al registro de ambos patrones, se implementó un algoritmo de desenvolvimiento para obtener un mapa de fases de ambos eventos. En la Figura 7.5, se muestran las fases obtenidas de los patrones de franjas registradas en las dos etapas comentadas anteriormente.

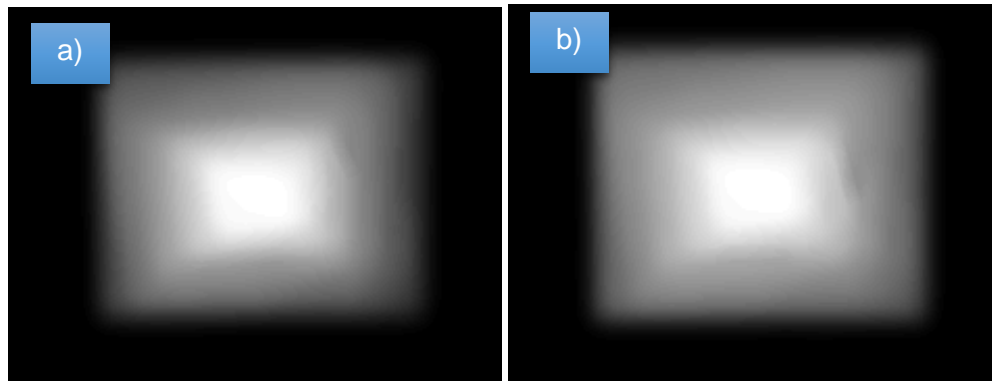


Figura 7.5 Obtención de fase mediante la proyección de franjas. a) Proyector comercial, b) Proyector propuesto.

Para obtener información de ambos mapas de fase, se obtuvo un perfil en un mismo punto para ambos mapas de fase, este perfil de alturas se muestra en la Figura 7.6, se puede apreciar que la información de altura coincide en ambos casos, la altura medida mediante un flexómetro fue de 0.37 cm, mientras que experimentalmente fue de 0.39 cm.

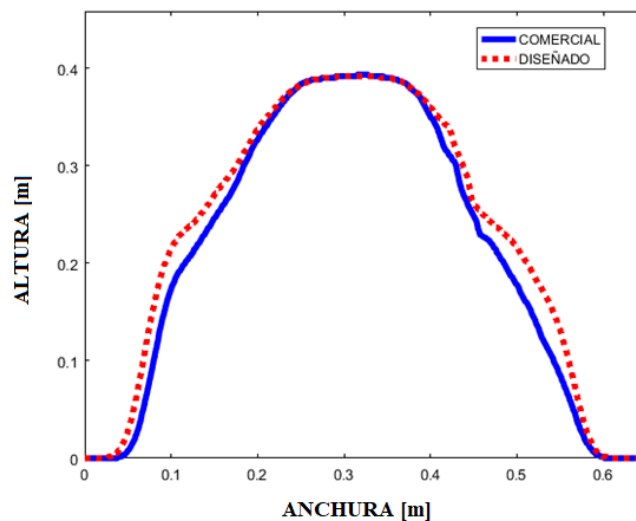


Figura 7.6 Obtención del perfil de altura del objeto bajo prueba con el mismo arreglo para un proyector comercial y el del diseño propuesto.

La obtención de un mapa de fase en ambiente controlado, fue para asegurar que el proyector que se diseñó era óptimo para implementarse en un arreglo de proyección de franjas. Como ya se ha comentado, la ventaja de este proyector es su peso ligero, por lo tanto, el drone puede transportarlo sin ningún problema, además de que la alimentación de corriente es independiente de la alimentación propia del drone. En la Figura 7.7 (a) se muestra la fase envuelta y desenvuelta para el caso en que se proyectó un patrón de franjas mediante el proyector multimedia. Una vez obtenida la fase envuelta se aplicó un algoritmo (Goldstein) de desenvolvimiento para obtener la fase desenvuelta como la mostrada en la Figura 7.7 (b).

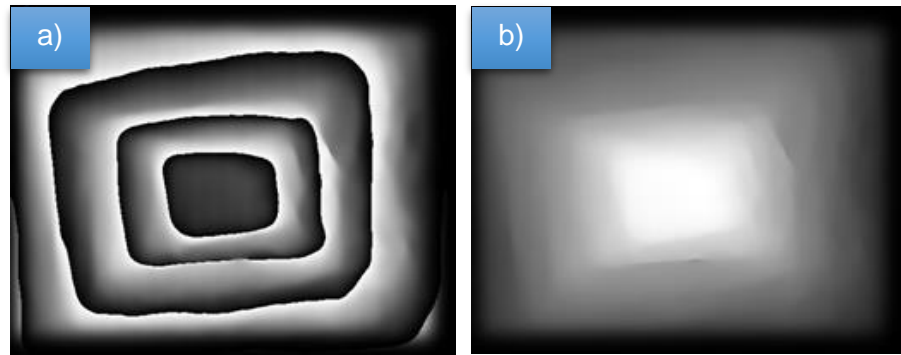


Figura 7.7 Mapa de fase obtenida en ambiente controlado. a) Fase envuelta, b) Fase desenvuelta.

A partir de la información del mapa de fase se puede generar numéricamente la topografía del objeto en unidades reales, como se aprecia en la Figura 7.8.

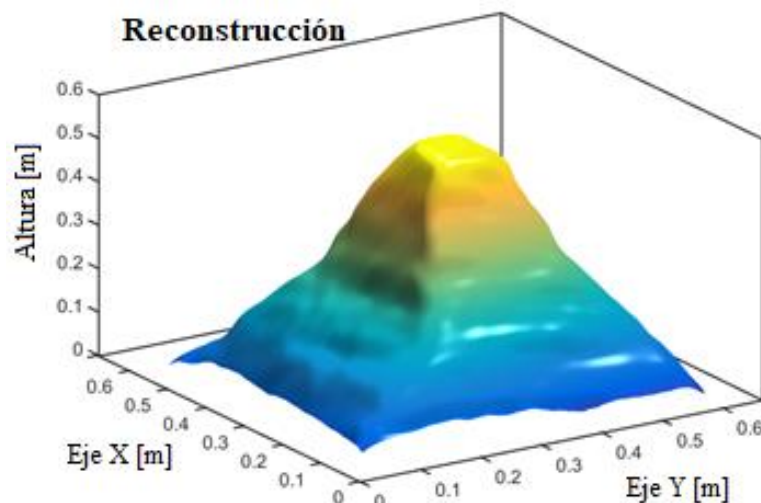


Figura 7.8 Reconstrucción del objeto en 3D obtenido a partir del mapa de fase.

7.2 Reconstrucción 3D del objeto bajo prueba en ambiente no controlado

Una vez analizado el proyector en ambiente controlado, una tercera etapa consistió en registrar datos en ambientes no controlados fuera del laboratorio, es decir mediante el drone y los dispositivos adaptados a su configuración básica. Tal como se había manejado en el capítulo 5, se mostró el dispositivo aéreo con los dispositivos implementados en él.

La calibración de la cámara del drone fue realizada para una separación entre cámara y objeto de 3 m, entonces la planeación del vuelo del drone fue para alturas aproximadas de 3 metros.

En la Figura 7.9 se puede observar la imagen del objeto bajo prueba con las franjas proyectadas sobre su superficie desde el drone que vuela a una altura de 2.99 m, dato obtenido por el sensor de ultrasonido adaptado al dispositivo, el patrón proyectado cuenta con un periodo espacial de $P_0=27\text{ mm}$.

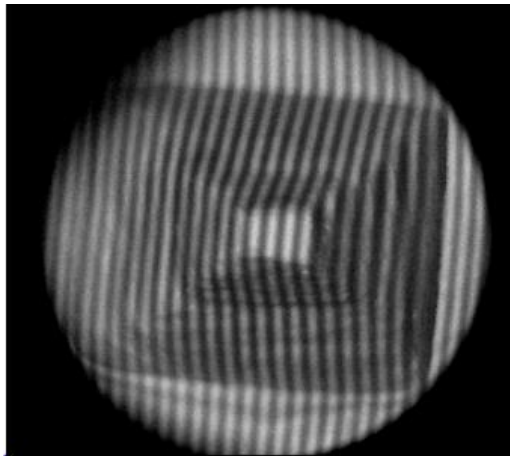


Figura 7.9 Patrón proyectado sobre el objeto bajo prueba registrado por la cámara del drone.

A partir de esta imagen se obtiene un mapa de fase para conocer la topografía del objeto bajo prueba. Para la obtención del mapa de fase se realiza el mismo proceso que en el caso de ambiente controlado. La fase envuelta y desenvuelta obtenida se muestra en la Figura 7.10.

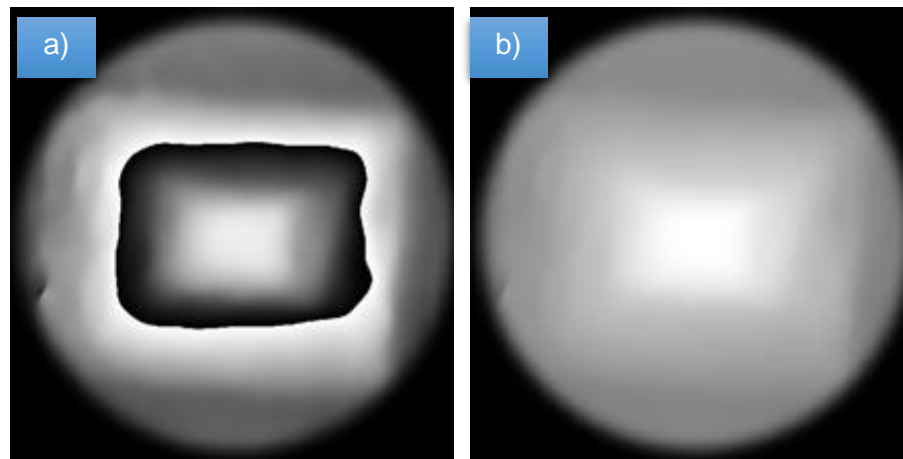


Figura 7.10 Mapa de fase obtenida de la imagen registrada con el sistema adaptado al drone. a) Fase envuelta, b) Fase desenvuelta.

Una vez obtenida la información del mapa de fase se generó numéricamente la topografía del objeto en unidades reales, como se puede apreciar en la Figura 7.11.

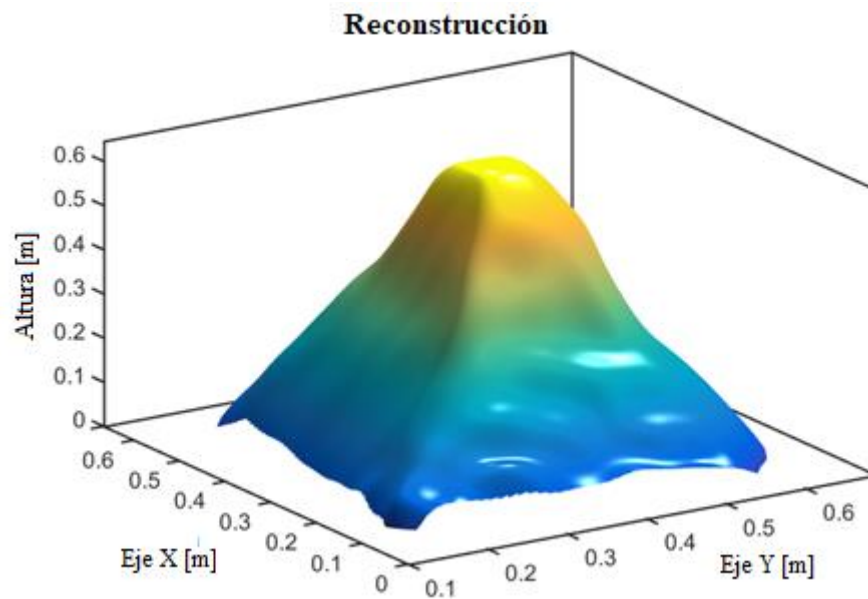


Figura 7.11 Reconstrucción tridimensional del objeto bajo prueba a una altura de vuelo de 2.99 m.

Finalmente resta corroborar qué tan eficaz fue la información de altura obtenida con el dispositivo aéreo modificado. A partir de los mapas de fase obtenidos dentro y fuera del laboratorio, se obtuvo el perfil de alturas en cada caso. Ambos perfiles se traslapan con ligeras

diferencias (Figura 7.12) y es evidente que existe una gran concordancia entre la información de altura obtenida bajo un ambiente controlado y otro no controlado.

La altura obtenida experimentalmente en el laboratorio fue de 0.390 cm, mientras que en el obtenido mediante el sistema propuesto fue de 0.389 cm.

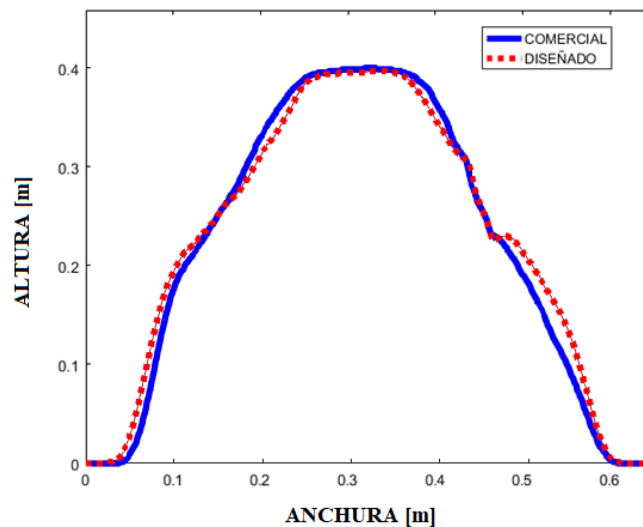


Figura 7.12: Obtención del perfil de altura del objeto bajo prueba a partir de los datos registrados mediante los dispositivos implementados en el drone modificado y los obtenidos en laboratorio.

Es difícil obtener una coincidencia del 100 %, ya que en el laboratorio el arreglo experimental es estático y fuera de laboratorio cuasi dinámico, a pesar de que el drone cuenta con una gran estabilidad existen otros parámetros difíciles de controlar, ambientales como pequeñas ráfagas de viento al momento de registrar los datos, y humanos ya que una sola persona realiza todo el proceso de control de vuelo y del registro de datos.

Sin duda alguna, que todos estos parámetros extras podrán ser solucionados en futuros trabajos relacionados con este proyecto de tesis.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES

En este trabajo, nos enfocamos en la obtención de imágenes para topografías en regiones de interés con un área reducida, usando un dispositivo aéreo, al cual se le adaptaron diversos componentes para así obtener reconstrucciones tridimensionales en alta resolución usando la técnica de proyección de franjas.

Para llevar a cabo la técnica de proyección de franjas, fue necesario modificar el diseño original del dron, se diseñaron e imprimieron piezas para adaptar mecánicamente las componentes ópticas y electrónicas, sujetándolos de forma estable. Para el diseño del proyector se consideraron las limitantes de peso, tamaño y potencia del mismo. El armado físico del proyector fue fabricado usando la impresión 3D, considerando el acomodo y las especificaciones de las componentes que fueran acorde al diseño óptico teórico. Para que el proyector tuviera la suficiente potencia para la emisión, fue requerido incorporar un LED de alta potencia con su debida disipación de calor y su fuente de alimentación. Se adaptaron sistemas electrónicos los cuales fueron acoplados a una tablilla basada en Arduino para tener el control del proyector y otros dispositivos adaptados, de tal forma poder transmitir los datos a la base vía inalámbricamente, para posteriormente trabajar con esa información.

Las fotografías adquiridas por el drone y por las adaptaciones a éste, son procesadas en conjunto, para obtener la representación tridimensional del área de estudio.

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que nuestro dispositivo es un gran candidato para obtener topografías de pequeñas regiones mediante la combinación de la técnica de proyección de franjas y dispositivos aéreos controlados remotamente. En un futuro se puede adaptar más sensores y obtener información adicional, como sensores de gas y temperatura. Así, como modificar el telescopio adaptado a la cámara para registrar regiones más amplias a una mayor altura de vuelo. Otra ampliación sería registrar varias imágenes y fusionar las escenas y obtener topografías de regiones más amplias. Una ventaja de nuestro sistema es que además se pueden obtener información 3D en interiores debido a que la comunicación de la estación en tierra con los sensores adaptados como altímetro y el drone se hace mediante conexión

inalámbrica. Una de las carencias que presenta nuestro sistema es la falta de la inclusión de una cámara térmica, encargada de realizar las mediciones de temperatura.

Por último y nada sencillo, sería construir a futuro es construir un cuadricóptero con elementos disponibles comercialmente y en él montar los componentes necesarios para abarcar y superar los objetivos de este trabajo de tesis, además de aumentar el rango de posibles problemas a resolver.

REFERENCIAS

- [1] V. V. Klemas, «Coastal and Enviromental Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: An OverView,» *JCR*, vol. 31, nº 5, pp. 1260-1267, 2015.
- [2] T. Tomic y K. Schmid, «Toward a Fully Autonomus UAV Research Platform for Indoor and Outdoor,» *IEEE ROBOTICS & AUTOMATION MAGAZINE*, pp. 46-56, 28 SEPTEMBER 2012.
- [3] F. Fraundorfer, «Building and site reconstruction from small scale unmanned aerial vehicles (UAV's),» *IEEE*, 2015.
- [4] U. G. Sefercik, M. Alkan y G. Buyuksalih, «Generation and validation of high-resolution DEMS from worldview-2 stereo data,» *Photogrammetric Record*, vol. 28, nº 144, pp. 362-374, 2013.
- [5] R. Nelson, T. Gobakken, E. Naeset, T. Gegoire, G. Stahl, S. Holm y J. Flewelling, «Lidar sampling - Using an airborne profiler to estimate forest biomass in Hedmark Country, Norway,» *Remote Sensing of Environment*, vol. 123, pp. 563-578, 2012.
- [6] M. Pieraccini, G. Guidi y C. Atzeni, «3D digitizing of cultural heritage,» *Journal of Cultural Heritage*, p. 63-70, 2001.
- [7] J. Pereira, «<http://www.jpereira.net/>,» 09 01 2011. [En línea]. Available: <http://www.jpereira.net/software-revisiones-y-consejos/cloudcompare-analisis-de-nubes-de-puntos-para-fotogrametria>. [Último acceso: 07 11 2017].
- [8] F. Clapuyt, V. Vanacker y K. Van Oost, «Reproducibility of UAV - based earth topography reconstructions based on Structure - from - Motion algorithms,» *Geomorphology*, 2014.
- [9] D. Malacara, Optical Shop Testing, New Jersey Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, July 2007.
- [10] G. Fornaro y E. Sansosti, «A Two-Dimensional Region Growing Least Squares Phase Unwrapping Algorithm for Interferometric SAR Processing,» *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, vol. 37, nº 5, pp. 2215-2226, 1999.
- [11] Y. Zhua, A. Li y W. panc, «Discussions on phase-reconstructing algorithms for 3D digitizing structure-light profilometry,» *Optik*, vol. 122, p. 162-167, 2011.
- [12] E. Zappa y G. Busca, «Comparison of eight unwrapping algorithms applied to Fourier-transform profilometry,» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 46, nº 2, pp. 106-116, 2008.
- [13] «<http://www.ni.com>,» National Instruments Corporation, Junio 2012. [En línea]. Available: https://zone.ni.com/reference/en-XX/help/371361J-01/lvanls/unwrap_phase/. [Último acceso: 13 11 2017].
- [14] T. J. Flynn, «Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map,» *IEEE Proc.*, pp. 2057-2059, 1996.

- [15] D. C. Ghiglia y M. D. Pritt, Two-dimensional phase unwrapping: theory, algorithms, and software, New York: Wiley, 1999.
- [16] R. Idrissiel-Azami, H. Tairi y B. Bellach, «Phase Extraction Method in Fringe Projection Profilometry Using Instantaneous Frequency,» *Imaging and Visualization*, pp. 62-66, 2016.
- [17] T. Yoshida, K. Irie y E. Koyanagi, «3D laser scanner with gazing ability,» *International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3098-3103, 2011.
- [18] J. Oberländer, L. Pfozter, A. Roennau y R. Dillmann, «Fast calibration of rotating and swivelling 3-D laser scanners exploiting measurement redundancies,» *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IRO)*, pp. 3038-3044, 2015.
- [19] M. Takeda y K. Mutoh, «Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes,» *Applied Optics*, vol. 22, p. 3977, 1983.
- [20] E. Zappa y G. Busca, «Static and dynamic features of Fourier transform profilometry: A review,» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 50, pp. 1140-1151, 2012.
- [21] C. J. Tay, C. Quan y L. Chen, «Phase retrieval with a three-frame phase-shifting algorithm with an unknown phase shift,» *Optical Society of America*, vol. 44 No.8, pp. 1401-1409, 2005.
- [22] W. Pei, A. ZhiJie, Z. YongYing, Z. Li, W. XiangJie y W. JingMei, «Accuracy measurement of object's 3D topography based on phase shifting profilometry,» *Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC)*, pp. 1140-1143, 2013.
- [23] Z. Song y Y. Shing-Tung, «High-speed three-dimensional shape measurement system using a modified two-plus one phase-shifting algorithm,» *Optical Engineering*, vol. 46(11), n° 113603, pp. 1-6, 2007.
- [24] G. Meng y H. Pan, «The Application of Ultrasonic Sensor in the Obstacle Avoidance of Quad-rotor UAV,» *Navigation and Control Conference*, pp. 976-981, 2016.
- [25] J. Griffey, «3-D Printers for Libraries,» de *Library Technology Reports*, 2014, pp. 8-12.
- [26] «www.cree.com,» Cree, Inc., 2014-2017 . [En línea]. Available: <http://www.cree.com/led-components/media/documents/ds-XHP70.pdf>. [Último acceso: 01 11 2017].
- [27] «www.cree.com,» 2004-2016. [En línea]. Available: <http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampThermalManagement.pdf>. [Último acceso: 01 11 2017].
- [28] V. Stanovov y E. Semenkin, «Streaming Pulse Data to the Cloud with Bluetooth LE or NODEMCU ESP8266,» 2016.
- [29] «<http://espressif.com>,» Espressif Systems (Shanghai) Pte., Ltd. All rights reserved., 2017. [En línea]. Available: <http://espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview>. [Último acceso: 01 11 2017].

- [30] «<http://www.nodemcu.com>,» NodeMcu Team , 2014. [En línea]. Available: http://www.nodemcu.com/index_en.html#fr_54745c8bd775ef4b99000011. [Último acceso: 01 11 2017].
- [31] «<https://www.wemos.cc/>,» WEMOS.CC, 2017 . [En línea]. Available: https://wiki.wemos.cc/products:d1:d1_mini. [Último acceso: 01 11 2017].
- [32] «github.com,» Design Informatics Lab | School for Engineering of Matter, Transport and Energy, Arizona State University, 2017. [En línea]. Available: http://designinformaticslab.github.io/productdesign_tutorial/2017/01/31/altitude_sensor.html. [Último acceso: 01 11 2017].
- [33] «www.aprendiendoarduino.com,» [En línea]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/category/tcpip/>. [Último acceso: 30 10 2017].
- [34] [En línea]. Available: <http://www.uca.edu.sv/investigacion/tutoriales/tcp-ip.html>.
- [35] C. Hernández Posadas, *Sistema de detección y seguimiento para derribo aéreo de drones*, Nezahualcóyotl, Estado de México, 2015.
- [36] «en.wikipedia.org,» [En línea]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasound>. [Último acceso: 01 11 2017].
- [37] «www.maxbotix.com,» 2015. [En línea]. Available: https://www.maxbotix.com/documents/LV-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf. [Último acceso: 01 11 2017].
- [38] «WordPress.com,» 03 2014. [En línea]. Available: <https://billwaa.wordpress.com/2014/03/11/arduino-ultrasonic-range-finder-xl-maxsonar/>. [Último acceso: 01 11 2017].
- [39] M. Sadiku, «MEMS,» *IEEE Potentials* , vol. Volume:21 , n° Issue: 1, pp. 4 - 5, 07 August 2002.
- [40] «www.sparkfun.com,» SparkFun Electronics, [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/products/11084>. [Último acceso: 01 11 2017].
- [41] «www.sparkfun.com,» Sparkfun Electronics, [En línea]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/mpl3115a2-pressure-sensor-hookup-guide>. [Último acceso: 01 11 2017].
- [42] «github.com,» GitHub, 2017. [En línea]. Available: https://github.com/sparkfun/MPL3115A2_Breakout. [Último acceso: 01 11 2017].
- [43] «www.adafruit.com,» Adafruit, [En línea]. Available: <https://www.adafruit.com/product/757>. [Último acceso: 01 11 2017].
- [44] A. Khan y B. Roscoe, «Open-Path Greenhouse Gas Sensor for UAV applications,» OSA, 2012.
- [45] G. Sohn y I. Dowman, «Data fusion of high-resolution satellite imagery and LiDAR data for automatic building extraction,» *Photogrammetry and remote sensing*, vol. 62, pp. 43-63, 2007.

- [46] J. P. Dandois, M. Olano y E. C. Ellis, «Optimal Altitude, Overlap, and Weather Conditions for Computer Vision UAV Estimates of Forest Structure,» *Remote sensing*, pp. 13895-13920, 2015.
- [47] D. Turner, A. Lucieer y C. Watson, «An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds,» *Remote Sensing*, vol. 4, pp. 1392-1410, 2012.
- [48] C. Stöcker, A. Eltner y P. Karrasch, «Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry - A case study from Andalusia, Spain,» *Catena*, vol. 132, pp. 1-11, 2015.
- [49] W. Zhang, J. Zhao, M. Chen, Y. Chen, K. Yan, L. Li, J. Qi, X. Wang, J. Luo y Q. Chu, «Registration of optical imagery and LiDAR data using an inherent geometrical constraint,» *OSA*, vol. 23, nº 6, 2015.
- [50] W. BOEHLER y A. MARBS, «3D SCANNING INSTRUMENTS,» *Journal of Cultural Heritage*, 2002.
- [51] I. Cetin y S. Okur, «Documentation of cultural heritage using digital photogrammetry and laser scanning,» *Journal of Cultural Heritage*, vol. 8, nº 4, pp. 423-427, 2007.
- [52] Y. Toru, *Handbook of Optical Metrologic Principales and Applications*, New York: Taylor & Francis Group, pp. 263-280.
- [53] H. Takasaki, «Moiré topography,» *Applied optics*, vol. 14, nº 1, pp. 177-179, 1975.
- [54] M. Takeda, «Fourier Fringe Demodulation,» de *Phase Estimation in Optical Interferometry*, CRC Press , 2014, p. 1–30.
- [55] Gonzales, *Digital image proccesing using MATLAB*, Igarss , 2014.
- [56] F. Fraundorfer, «Building and site reconstruction from small scale unmanned aerial vehicles (UAV's),» *IEEE*, 2015.
- [57] «Vision Based Attitude And Altitude Estimation For UAVs In Dark Environments,» *Intelligent Robots and Systems*, pp. 25-30, September 2011.
- [58] K. J. Gåsvik, *Optical metrology*, 2003.
- [59] X. Su y W. Chen, «Fourier transform profilometry: A review,» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 35, nº 5, pp. 263-284, 2001.
- [60] S. Esposito, P. Fallavollillita, W. Wahbeh , C. Nardinocchi y M. Balsi, «Performance evaluation of UAV photogrammetric 3D reconstruction,» *IEEE*, 2014.
- [61] Z. Xu, L. Wu, Y. Shen, F. Li, Q. Wang y R. Wang, «Tridimensional Reconstruction Applied to Cultural Heritage with the Use of Camera-Equipped UAV Terrestrial Laser Scanner,» *Remote Sensing*, vol. 6, pp. 10413-10434, 2014.
- [62] C. Stöcker, A. Eltner y P. Karrasch, «Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry - A case study from Andalusia, Spain,» *Catena*, vol. 132, pp. 1-11, 2015.

- [63] G. Sohn y I. Dowman , «Data fusion of hhigh-resolution satellite imagery and LiDAR data for automatic building extraction,» *PHOTOGRAMMETRY & REMOTE SENSING*, vol. 62, pp. 43-63, 2007.
- [64] C. Mallet y F. Bretar, «Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art,» *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 64, pp. 1-16, 2008.
- [65] U. G. Sefericik, M. Alkan y G. Buyuksalih, «GENERATION AND VALIDATION OF HIGH-RESOLUTION DEMS FROM WORLDVIEW-2 STEREO DATA,» *THE PHOTOGRAMMETRIC RECORD*, vol. 288, nº 144, pp. 362-374, 2013.
- [66] D. Malacara, *Optical Shop Testing*, vol. 3, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [67] .. , W.-M. Z. ,. , H. H. H.-G. L. D. C. Guang Menga, «Micro-rotor dynamics for micro-electro-mechanical systems (MEMS),» *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. Volume 40, nº Issue 2, p. 538–562, April 2009.
- [68] «www.cree.com,» 2010-2016 . [En línea]. Available: http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLamp_PCB_Thermal.pdf. [Último acceso: 01 11 2017].

ANEXO A

ÓPTICA GEOMÉTRICA

A.1 Ley de Snell

Ley de Snell, establece que cuando la luz incide en un medio refractor ésta cambia su velocidad y trayectoria a su paso a través de él.

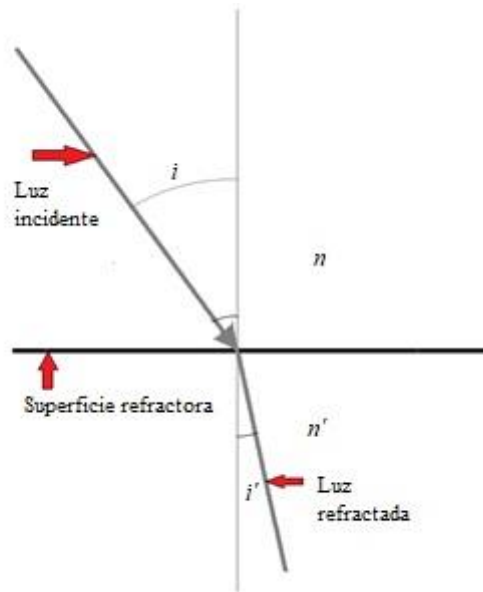


Figura A.1 Esquema que representa la ley de Snell.

Donde n es el índice de refracción del medio por donde viaja la luz y n' es el índice de refracción del medio refractor en donde incide la luz. En la ecuación 1.1 se muestra la ecuación de Snell de refracción de la luz a través de objetos transparentes.

$$n \sin i = n' \sin i' \quad (\text{A.1})$$

A.2 Lentes delgadas

Para formar imágenes con lentes delgadas se usan las ecuaciones de Gauss que desprecian el espesor de la lente. Para realizar los cálculos y considerando que la lente estará inmersa en aire se obtuvo la fórmula A.2:

$$(n_1 - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{s'_2} - \frac{1}{s_1} \quad (\text{A.2.})$$

En donde n_1 es el índice de refracción del material de la lente, r_1 y r_2 son los radios de curvatura de la lente mientras que s'_2 es la distancia de la imagen generada por la lente y s_1 es la distancia entre la lente y el objeto real. Las lentes tienen dos puntos focales F de los cuales uno se encuentra a la izquierda y otro a la derecha de su plano principal, respectivamente. Esto quiere decir que ambos lados poseen el mismo valor en F , siendo estos de signo contrario, lo cual es expresado en la siguiente ecuación (A.3).

$$-\frac{1}{F} = \frac{1}{F'} = (n_1 - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{A.3.})$$

Al combinar las ecuaciones A.2. Y A.3, se obtiene la ecuación A.4.

$$-\frac{1}{F} = \frac{1}{F'} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s} \quad (\text{A.4.})$$

Dónde: F = Foco de la lente; s = Distancia al objeto; s' = Distancia de la imagen.

Para el caso de la formación de imágenes de interés y el logro de una adecuada proyección de imágenes con amplificación se consideró que, la imagen a proyectar tiene que estar lo más cercana al foco de la lente amplificadora para obtener una mayor amplificación de la imagen, evitando que esta se encuentre en el foco ya que bajo esta condición la imagen se forma en infinito y para el propósito de este proyecto carece de sentido práctico.

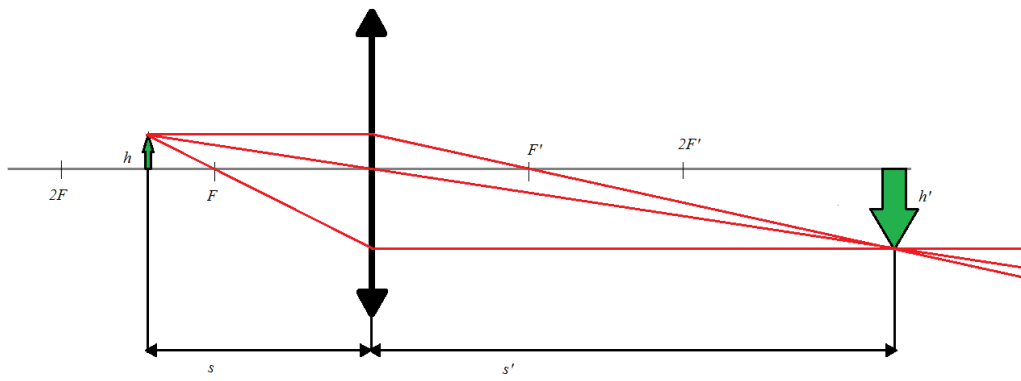


Figura A.2 Cuando el objeto se encuentra entre $2F$ y F la imagen es amplificada pero resulta invertida.

ANEXO B

SELECCIÓN DE DISPOSITIVO DE COMUNICACIÓN

Para enviar instrucciones remotamente es necesario: tener comunicación entre los dispositivos, adquirir esa información en tierra, ayudar con el procesamiento de la información y tomar decisiones durante el vuelo. Esto se puede lograr usando comunicación por radiofrecuencia. Al inicio del proyecto se pensó en usar la tecnología Bluetooth pero fue descartado debido a que el alcance de estos dispositivos es limitado. La imposibilidad de generar una red a través de este tipo de radiofrecuencia y su ancho de banda es demasiado limitado, aun existiendo Bluetooth 4.0 BLE (Bluetooth Low Energy) que tiene la capacidad de comunicarse a distancias más largas dependiendo de la potencia que tenga el emisor. Existen equipos con un mayor rango de distancia pero estos dispositivos se tornan costosos por lo que se vieron diversas opciones para hacer la interconexión con un Arduino y debido a esto se descartó la utilización del MiWi (MRF24J40) ya que el sistema desarrollado para este dispositivo está principalmente enfocado a un entorno de Microchip. Posteriormente se analizó el uso del XBEE debido a que presta buen rango de transmisión a distancias largas, pero el detalle de no usar este dispositivo se encuentra principalmente en que se tienen que usar dos o más de ellos para lograr armar una red entre ellos por lo que no resultaba ser factible en cuanto al costo total del sistema siendo abonado a que este dispositivo su interfaz de comunicación es a través de protocolo RS232 que es una comunicación serial asíncrona en la cual pueden existir problemas de comunicación debido a que no se tiene garantizado si llegó adecuadamente el mensaje al receptor. El problema también reside en que ambos dispositivos (el Arduino y el XBEE) trabajan a distintas velocidades, la velocidad entre ambos puede variar, si bien la velocidad de transmisión se puede fijar en cada uno de los relojes se puede presentar el error donde uno o ambos cuarzos sufran pequeñas variaciones provocando en éstos una desincronización entre el microcontrolador y el módulo de RF, lo cual puede resultar catastrófico estando en el aire. Posteriormente se analizó usar el nRF24I01 resultando ser un dispositivo económico y de fácil de comunicación con Arduino, gracias a que este dispositivo se comunica por protocolo SPI que evita que existan variaciones en ambos relojes (debido a que se usa el reloj del maestro) de tal forma que la comunicación sería buena, el detalle reside en

que se necesitan dos módulos iguales con microcontrolador para lograr la comunicación, incrementando el precio de desarrollo e implementación, dejando de lado que la comunicación se limita a 62 m de alcance.

El módulo ESP8266 es un dispositivo concebido para tareas de la web de las cosas. Este dispositivo se seleccionó con el firme propósito de tener una unidad de microcontrolador/procesamiento/comunicación, con la función de hacer lectura de sensores y activación de actuadores en el aire a través de la comunicación remota en tierra, sobre la información adquirida en base a los sensores para obtener los datos necesarios y con ello llevar a cabo la técnica de proyección de franjas.

El dispositivo ESP8266 es un SOC (Sistem On Chip) y cuenta con un alto grado de integración siendo este por lejos, superior a los demás chips de WiFi el cual integra un MCU Tensilica de 32 bits, con diversos módulos basados en circuitos de señal digital, señales analógicas y mixtas. El dispositivo en sí es una solución para realizar conexiones inalámbricas mediante WiFi y siendo éste plenamente autónomo puede realizar las comunicaciones actuando como el anfitrión de la aplicación del dispositivo o utilizar todas las aplicaciones de la red desde otro dispositivo de procesamiento externo. La Arquitectura del dispositivo permite la capacidad de procesamiento.

Se analizaron distintos dispositivos de procesamiento, lectura y actuación para el sistema desarrollado pero se tomó la decisión en base a sus características técnicas como se muestra en la Tabla B.1. También se hizo la diferenciación de distintos módulos de comunicación inalámbrica tal como es mostrado en la Tabla B.2 para encontrar el más versátil para esta aplicación.

Tabla B.1 Comparación de microcontroladores para la aplicación requerida.

	UNO	MKR1000	ESP-12E (NODEMCU)	PIC18F2550
VCC	5 v	3.3 v	3.3 v	5 v
Entradas analógicas	8	7	1 ch @10-bit	10 ch @ 10-bit
Entradas digitales	14	15	10	16
Salidas analógicas	no	1	no	No
Memoria Flash	32 KByte	256 Kbyte	4 MByte	32 Kbyte
Trasmisión de datos	no	2.4 GHz IEEE® 802.11 b/g/n Wi-Fi	2.4 GHz 802.11 b/g/n WiFi	No
Velocidad de transmisión	no	?	DSSS @ 1Mbps - MCS7 @ 72.2Mbps	No
Entrada de voltaje (recomendado)	7-12 v	5 v	3.0 v - 10 v	4.2 - 5.5 v
Poder de salida del transmisor	n/a	802.11b /11Mbps: 17dBm ±1dB – 802.11g /54Mbps: 16dBm ±1dB @ EVM - 28dB – 802.11n /72Mbps: 14dBm ±1dB @ EVM-30Db	802.11 n: + 14 dBm - 802.11 g: + 17 dBm - 802.11 b: +20 dBm	n/a
Sensibilidad del receptor	n/a	?	802.11 n: -72 dbm (MCS7) - 802.11 g: -75 dbm (54Mbps) - 802.11 b: -91 dbm (11Mbps)	n/a
Velocidad del reloj	16 MHz	32.768 kHz (RTC), 48 MHz	80 - 160 MHz	31 KHz to 8 Mhz (RTC) - 48 MHz external

Dimensiones	80 x 55 mm	68 x 30 mm	16 x 24 mm (25.6 x 48 mm NODEMCU)	8.5 x 3.55 mm
Corriente de alimentación	?	700 mAh	80 mA	75 mA
Precio	\$22.28 USD	\$34.52 USD	\$3 USD	\$5.60 USD
Peso	30 g	12 g	26 g	10 g
Microcontrolador	31 g	SAMD21 Cortex-M0+ 32bit low power ARM MCU	Tensilica L106 32-bit	PIC18F2550
UART	sí	Sí	sí	Sí
SPI	sí	Sí	sí	Sí
I2C	sí	Sí	sí	Sí
Interface	I2C, SPI, UART, PWM, etc.	I2C / SPI / USART / LIN2 /IrDA	I2C,I2S, SPI, UART, PWM, IrDA, etc.	1-UART, 1-A/E/USART, 1-SPI, 1-I2C1-MSSP(SPI/I2C)
Antena	n/a	PCB	PCB	n/a
Compatibilidad	n/a	con todos	con todos	n/a
Rango de transmisión	n/a	?	100 m	n/a

Tabla B.2 “Comparación de dispositivos con capacidad de transmisión mediante radiofrecuencia”

	MKR1000	ESP-12E (NODEMCU)	nRF24I01	MiWi	XBee-PRO
VCC	3.3 v	3.3 v	3.3 v	3.3 v	3.3 v
Entradas analógicas	7	1 ch @10-bit	no	No	6 ch @10-bit
Entradas digitales	15	10	no	2	8
Salidas analógicas	1	no	no	No	0
Memoria Flash	256 KByte	4 MByte	no	No	119 512 Byte
Trasmisión de datos	2.4 GHz IEEE® 802.11 b/g/n Wi-Fi	2.4 GHz 802.11 b/g/n WiFi	2.4 - 2.5 GHz ISM	2.405 GHz - 2.475 GHz IEEE 802.15.4	2.4 GHz ISM

Velocidad de transmisión	?	DSSS @ 1Mbps - MCS7 @ 72.2Mbps	250 KBps - 1 MBps	250 Kbps	250,000 bps
Entrada de voltaje (recomendado)	5 v	3.0 v - 10 v	1.9 - 3.6 v	3.0 - 3.6 v	2.8 - 3.4 v
Poder de salida del trasmisor	802.11b /11Mbps: 17dBm ±1dB – 802.11g /54Mbps: 16dBm ±1dB @ EVM -28dB – 802.11n /72Mbps: 14dBm ±1dB @ EVM- 30dB	802.11 n: + 14 dBm - 802.11 g: + 17 dBm - 802.11 b: +20 dBm	0, 6, 12 o 18 dBm	+19 dBm	63 mW (18 dBm)*10 mW (10 dBm) para variantes internacionales
Sensibilidad del receptor	?	802.11 n: - 72 dbm (MCS7) - 802.11 g: - 75 dbm (54Mbps) - 802.11 b: - 91 dbm (11MBps)	-82 dBm @ 2Mbps, - 85 dBm @ 1 Mbps ,- 94 dBm @ 250 kbps	-104.00dBm	-100 dBm (1% packet error rate)
Velocidad del reloj	32.768 kHz (RTC), 48 MHz	80 - 160 MHz	16 MHz	20 MHz	?
Dimensiones	68 x 30 mm	16 x 24 mm (25.6 x 48 mm NODEMCU)	15 x 29 mm	22.9 mm x 33.0 mm	2.438 cm x 3.294 cm
Corriente de alimentación	700 mAh	80 mA	13.5 mA	140 mA	295 mA
Precio	\$34.52 USD	\$3 USD	\$2.98 USD	\$20.71 USD	\$44.95 USD
Peso	12 g	26 g	10 g	22.6 g	?

Microcontrolador	SAMD21 Cortex- M0+ 32bit low power ARM MCU	Tensilica L106 32-bit	nRF24L0 1+	MRF24J40	?
UART	sí	sí	no	No	Sí
SPI	sí	sí	sí	Sí	No
I2C	sí	sí	no	No	No
Interface	I2C / SPI / USART / LIN2 / IrDA	I2C, I2S, SPI, UART, PWM, IrDA, etc.	4-Wire SPI	4-Wire SPI	UART
Antena	PCB	PCB	PCB	PCB / Coaxial (U.FL)	Integrated Whip, Chip o conector U.FL, conector RPSMA
Compatibilidad	con todos	con todos	con todos	Compatible con Microchip microcontrolador es familias PIC16, PIC18, PIC24, dsPIC33 y PIC32)	Compatible con Arduino y microcontroladore s Microchip (PIC16, PIC18, PIC24, dsPIC33 y PIC32)
Rango de transmisión	?	100 m	62 m	120 m	1600 m, 750 m variantes internacionales