

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**Diseño de una cámara multispectral de 4 bandas para  
agricultura de precisión**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

**ANTHONY RICARDO GONZALES HUISA**

**ASESOR: ANDRÉS FLORES ESPINOZA**

Lima, febrero del 2015

## RESUMEN

El monitoreo de los campos de cultivos es de suma importancia para tomar acción sobre estos. Por ello, el CIP (Centro Internacional de la Papa) realiza diversas investigaciones en las que utiliza el sensado remoto para obtener la información que requieren. Una de las herramientas para el monitoreo de los cultivos es la cámara multiespectral. Con estas cámaras se pueden adquirir imágenes en diversas longitudes de onda como en el espectro visible e infrarrojo cercano, y pueden ser utilizadas para obtener el nivel de estrés de un cultivo.

Este tipo de cámara tiene un costo elevado lo que lo hace inasequible a los agricultores peruanos. Por esta razón, el objetivo de esta tesis es de diseñar una cámara multiespectral de cuatro bandas que sea de bajo precio para que pueda ser adquirida por los agricultores.

Para la realización de este diseño se utilizó una cámara del fabricante Point Grey, la cual era controlada por una plataforma BeagleBone. Esta plataforma la configura para que capture imágenes al recibir una señal externa que se la brinda un hardware electrónico. Este hardware electrónico brinda la señal cuando cada uno de los filtros que se encuentra colocado en un disco giratorio se encuentre debajo del lente de la cámara.

Se obtuvo como resultados una cámara de un costo del 18,9% del precio de una cámara multiespectral comercial. Además, presenta mejoras frente a diseños anteriores desarrollados en la PUCP, tal como la necesidad de solo una cámara. Por último, la cámara multiespectral desarrollada tiene un tiempo de adquisición de imágenes de 200 ms, el cual es menor al tiempo de adquisición de la cámara ADC de Tetracam.

El aporte más resaltante de este diseño es que tiene la posibilidad de poder tomar en varias bandas con tan solo colocar más filtros en la plataforma giratoria.

Los proyectos futuros que se desarrollarían como mejoras deben centrarse en explorar nuevas plataformas de desarrollo más potentes que puedan controlar a cámaras con las que se pueda adquirir imágenes a mayor velocidad.

## ÍNDICE

Introducción.....	1
Capítulo 1. Aspectos generales de la problemática en la agricultura.....	2
1.1. Entorno General.....	2
1.2. Entorno Específico.....	3
1.3. Marco Problemático.....	3
1.4. Proceso de monitoreo actual.....	4
1.5.Desventajas del diseño de cámara multiespectral desarrollado en la PUCP.....	5
Capítulo 2. Tecnologías usadas en el análisis multiespectral.....	6
2.1. Estado del arte.....	6
2.2. Hipótesis.....	11
2.3. Fundamento teórico.....	11
Capítulo3. Planteamientos para la realización de una cámara multiespectral.....	15
3.1. Objetivos de la investigación.....	15
3.2. Requerimientos mínimos .....	15
3.3. Diagrama de bloques.....	15
3.4. Comparación entre las alternativas.....	25
Capítulo 4.Pruebas y Resultados.....	35
4.1. Pruebas de la cámara.....	35
4.2. Pruebas del hardware electrónico.....	36
4.3. Pruebas integrales.....	37
4.4. Analisis de requerimientos de corriente.....	40
4.5. Costos de diseño.....	41
Conclusiones.....	43
Recomendaciones.....	44
Bibliografía.....	45

## INTRODUCCIÓN

En la agricultura es muy importante conocer ciertos factores como es el estrés del cultivo o los niveles de clorofila de la vegetación. Para obtener la información necesaria, los agricultores peruanos utilizan métodos que implica la realización de caminatas a lo largo del cultivo lo cual requiere una cantidad de tiempo proporcional al área del cultivo. El proceso de monitoreo de los cultivos es de importancia para poder tomar acciones correctivas en el manejo agrícola y poder mejorar la producción.

El Centro Internacional de la Papa realiza investigaciones científicas sobre todo lo relacionado a tubérculos y raíces. En algunas de estas investigaciones, se utiliza cámaras multiespectrales para capturar imágenes de cultivos en distintas longitudes de onda para mejorar la agricultura. Este tipo de cámaras podría ser de gran utilidad para los agricultores, ya que les ayudaría a obtener información de su cultivo. Sin embargo, debido a su precio elevado, son inasequibles para estos.

El presente trabajo de tesis propone el diseño de una cámara multiespectral de cuatro bandas para ayudar al monitoreo de los cultivos. Las imágenes que se obtengan con esta cámara podrán ser usadas para la toma de decisiones sobre los cultivos.

Esta cámara multiespectral deberá cumplir con ciertos objetivos. Los objetivos principales son dos. En primer lugar, debe ser una cámara de costo menor a las cámaras multiespectrales comerciales para que sea asequible a los agricultores. En segundo lugar, debe presentar mejoras a diseños desarrollados anteriormente en la PUCP.

En el primer capítulo, se menciona el marco problemático que motiva el desarrollo de esta tesis y los procesos actuales de monitoreo. En el segundo capítulo, se explica los diversos métodos de análisis espectral y diversos conceptos que son utilizados en el presente documento. En el tercer capítulo, se menciona los objetivos y la forma en la que se logrará cumplir con estos objetivos. En el cuarto capítulo, se detallan las pruebas realizadas; así como, los resultados obtenidos de las mismas. Por último, se mencionan las conclusiones que se obtuvieron luego de realizar las diversas pruebas.

## CAPÍTULO 1

### ASPECTOS GENERALES DE LA PROBLEMÁTICA EN LA AGRICULTURA

El presente capítulo trata sobre la situación actual del monitoreo de cultivos en el Perú y nos comenta las deficiencias que este presenta.

#### **1.1. Entorno General**

Desde hace años la agricultura ha dejado de ser una labor artesanal para convertirse en una actividad global en la que deben convivir la sostenibilidad económica, la medioambiental y la social. La agricultura se enfrenta por lo tanto al enorme reto de alimentar a una población cada vez mayor. En los países desarrollados está cada vez más extendido el uso de soluciones tecnológicas para lograr una agricultura sostenible que lleve a la máxima eficiencia en el uso de recursos naturales (agua, suelo, energía y fertilizantes) y que, además, ofrezca un ahorro de costes. Los avances tecnológicos han permitido desarrollar la agricultura de precisión, que busca una mayor eficiencia en el cultivo mediante la gestión agronómica [33]. La Agricultura de Precisión es considerada como un Sistema Alternativo Sostenible, utilizado en la producción agropecuaria, en el cual se emplean diferentes métodos o herramientas tecnológicas como por ejemplo, los Sistemas de Posicionamiento Geoespacial (GPS) y la Electrónica[4]. Para la agricultura de precisión, Blackmore (2007) ha identificado tres tipos de variabilidad los cuales son los más representativos para la implementación de esta tecnología. El primero de ellos, la variabilidad espacial que puede ser vista de manera sencilla como los cambios que se presentan en un lote de tierra. El segundo aspecto importante identificado es la variabilidad temporal, la cual se refiere a la forma diferencial en la que actúa el tiempo con respecto al cultivo en sus diferentes fases (crecimiento, desarrollo y producción). La tercera idea a destacar es la variación predictiva, la cual se centra en explicar la forma en que varía los resultados previstos por el agricultor aplicando una serie de actividades con los resultados de producción real en el cultivo.[32]

## 1.2. Entorno Específico

### 1.2.1. Importancia de las cámaras multiespectrales

Actualmente, se realizan investigaciones científicas en el área de la agricultura, tales como estudios de ciertas enfermedades que atacan a los cultivos. Para realizar los análisis se utiliza el sensado remoto de la vegetación para lo cual se utilizan cámaras. Dichas cámaras deben poder ser capaces de capturar imágenes en ciertas longitudes de onda que permita hacer un monitoreo de ciertas características del cultivo. Las cámaras que pueden lograr lo requerido son las cámaras multiespectrales. Con estas cámaras se puede obtener ciertos factores sobre los cultivos tal como el factor NDVI que solo requiere imágenes en la longitud de onda roja e infrarroja.

Además, las cámaras multiespectrales también son utilizadas por agricultores, los cuales la usan para sensar de forma remota sus cultivos y conocer el estrés de su cultivo sin necesidad de recorrer en persona sus campos de cultivos.

Sin embargo, las cámaras multiespectrales tienen un costo elevado, lo cual restringe su uso y limita a las personas de bajos recursos a tener un buen control sobre sus cultivos o realizar investigaciones.

### 1.2.2. Centro Internacional de la Papa (CIP).

El Centro Internacional de la Papa (CIP), es una institución científica, sin fines de lucro, dedicada al desarrollo técnico y económico de la papa, el camote y otras raíces y tuberosas andinas, cuya sede principal está ubicada en Lima, Perú. El CIP también promueve el desarrollo rural integrado y el uso racional de los recursos, en la región montañosa del mundo, donde el cultivo de raíces y tubérculos juega un papel importante en la dieta y la economía. Para poder lograr sus objetivos, el CIP realiza diversos trabajos de investigación en el área de la agricultura de precisión.[31]

## 1.3. Marco Problemático.

En la agricultura, los que trabajan los cultivos deben conocer una serie de factores para asegurar la calidad del cultivo y una óptima cosecha. Deben asegurarse que todo campo de cultivo haya crecido según lo estimado y que no existan algunas áreas de cultivo en las que la semilla no logró ser germinada o no creció según lo previsto.



En el mundo agrícola, conocer el nivel de nitrógeno y clorofila de los cultivos es esencial para poder asegurar la alta calidad de los mismos. El nitrógeno es esencial para el correcto desarrollo de las plantas; cuando existe carencia de este, se disminuye el tamaño de las plantas.

Además, los agricultores presentan un gran interés por poder conocer el nivel de nitrógeno que poseen las plantas de sus cultivos. Conociendo ese factor, pueden brindarles a las plantas el nitrógeno que necesitan de manera externa y manual.

Por otro lado, se posee un diseño de cámara multiespectral desarrollado en la PUCP y se desea mejorar dicho producto.

#### **1.4. Proceso de monitoreo actual.**

El monitoreo de cultivos consiste en visitar periódicamente los lotes de cultivos, evaluando la presencia de plagas, de organismos benéficos y la interacción que ambos tienen con las áreas cultivadas en base a una cierta cantidad de muestras. Tras lo cual, se generan informes detallados con los cuales el productor pueda tomar una mejor decisión. [23]

En el Perú, los agricultores deben realizar caminatas alrededor y dentro de los cultivos para poder verificar que todas las plantas se hayan germinado. Sin embargo, los cultivos nunca se germinan en su totalidad. Como este método no es eficiente, nunca se logra localizar en su totalidad esas áreas que no fueron germinadas.

##### **1.4.1. Desventajas del proceso de monitoreo actual.**

Este proceso mencionado tiene desventajas que serán explicadas a continuación.

En primer lugar, si es que el campo de cultivo es extenso, el personal encargado de realizar las visitas periódicas demorará una mayor cantidad de tiempo en realizar el monitoreo.

En segundo lugar, mientras mayor área tenga el terreno de cultivo, el personal a cargo de las visitas periódicas debe ser mayor, lo cual genera un mayor costo para el productor.

Por último, el personal encargado tomará cierta cantidad de muestras y de acuerdo a esto se tomarán las decisiones correctivas. Sin embargo, este método

se basa en probabilidades y existe un rango de error que podría provocar tomar la decisión incorrecta sobre los cultivos.

### **1.5. Desventajas del diseño de cámara multiespectral desarrollado en la PUCP.**

En primer lugar, este diseño requiere de una cámara por cada longitud de onda en la que se requiera capturar las imágenes.

En segundo lugar, es difícil de modificar el diseño para poder aumentar el número de bandas en las que se puede capturar.

Por último, la utilización de varias cámaras significa un incremento en el costo del diseño.





## CAPÍTULO 2

# TECNOLOGÍAS USADAS EN EL ANÁLISIS MULTIESPECTRAL

En el presente capítulo se presentará el estado del arte, la hipótesis y se definirá algunos conceptos que son importantes para la comprensión del presente trabajo.

### **2.1. Estado del arte.**

En la actualidad, existen diversos métodos de análisis espectral; así mismo, existen cámaras comerciales que pueden ser usadas en la agricultura de precisión. Además, en el Perú se ha diseñado cámaras multiespectrales que han sido utilizadas para la agricultura. A continuación, se abordará más en estos temas.

#### **2.1.1. Métodos de análisis espectral.**

Existen diversos métodos que se utilizan actualmente para realizar un análisis espectral de imágenes. A continuación, se describirán dichos métodos.

##### **A. Métodos de escaneo de longitud de onda.**

En este método, la forma más sencilla de realizar el análisis espectral es usando un conjunto de filtros (figura 2.2.) en el que cada uno transmite una banda angosta de longitud de onda; sin embargo, tiene la debilidad de no poder utilizar una gran cantidad de filtros. [2] Para superar esta debilidad, se utilizan filtros variables, debido a que son más compactos y robustos. Existen tres tipos de filtros variables que son muy usados y son el filtro circular variable (CVF) (Figura 2.1.), filtro sintonizable de cristal líquido (LCTF) (Figura 2.3.), y el filtro acústico-óptico sintonizable (AOTF) (Figura 2.4.). De estos tres tipos, el primero utiliza partes móviles mientras que los otros 2 no las utiliza. A continuación se explica cada uno de estos tipos .[2]

La CVF transmite una luz de banda estrecha en función de la posición del haz en su superficie; es decir, en cada posición del filtro se transmitirá una longitud de onda distinta. El AOTF y LCTF poseen componentes electro-ópticos ,lo cual les permite funcionar sin partes móviles. El sistema LCTF transmite una longitud de onda mediante la aplicación de un voltaje variable en un cristal líquido

polarizable, el cual se encuentra colocado entre dos polarizadores lineales (Fig. 2.3.). Un AOTF utiliza un cristal al cual se le aplican ondas acústicas, siendo el dióxido de telurio ( $\text{TeO}_2$ ) el más usado (Fig. 2.4.). En este método, se varía la frecuencia de las ondas acústicas, provocando una cierta deformación en el cristal, lo cual producirá que se transmita en distintas longitudes de onda. Con estos filtros, se capturará una imagen completa en una determinada longitud de onda. Además, tiene la ventaja de poder elegir independientemente cuántas imágenes se capturan en una determinada longitud de onda. Por último, la resolución espectral depende del hardware y, para un sistema dado, no se puede cambiar. [2]

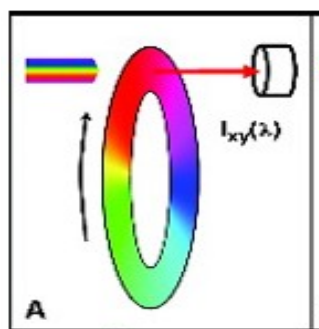


Figura 2.1. Filtro Circular Variable. [2]

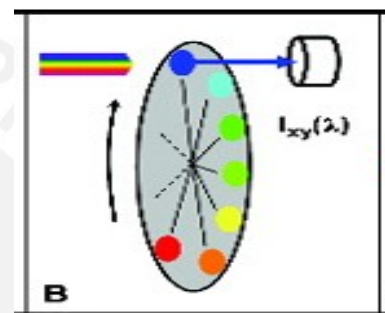


Figura 2.2. Conjunto de filtros. [2]

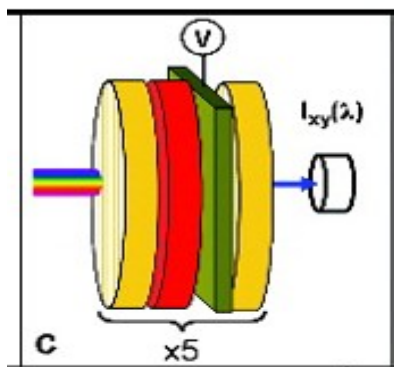


Figura 2.3. Filtro Sintonizable de cristal líquido.[2]

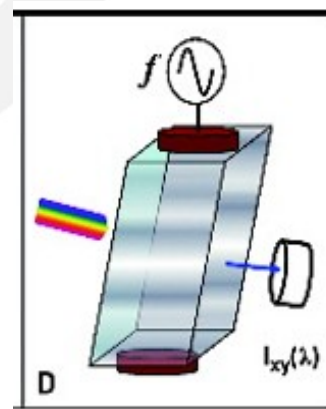


Figura 2.4. Filtro acústico-óptico sintonizable. [2]

### B. Métodos de escaneo espacial.

En este método, la dispersión de la luz se logra mediante el uso de una rejilla o un prisma (fig. 2.5.) con lo cual solo se puede medir una línea del objeto a la vez. Es por ello, que para obtener la información de toda una imagen espectral se requiere escanear línea por línea hasta completar la información del objeto. Este tipo de método tiene una ventaja cuando el objeto medido se encuentra en un movimiento lineal y se puede aplicar, por ejemplo, durante la exploración de una muestra de Papanicolau en una etapa automatizada. Por otro lado, la desventaja de utilizar este método es que se requiere un mecanismo de exploración, incluso si no es una parte intrínseca del sistema óptico. También es posible medir la imagen espectral con un microscopio que escanea punto por punto al objeto con un detector fotomultiplicador; sin embargo, se requiere un tiempo de adquisición más largo con el fin de lograr el mismo SNR. [2]

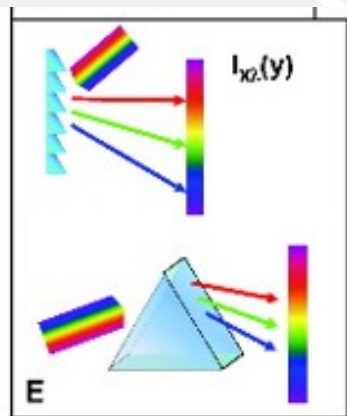


Figura 2.5. Metodo de escaneo espacial. [2]

### C. Método de escaneo en el tiempo.

Este método se basa en la medición de datos espectrales de un objeto a lo largo de un tiempo determinado. Estos datos necesitan ser transformados para poder obtener la imagen espectral. Un método de este tipo es la espectroscopia de Fourier (Figura 2.6.), en el cual se mide el espectro mediante el uso de la interferencia de luz y no utilizando filtros. Para el método mencionado se requiere la utilización de un interferómetro, el cual es un sistema que divide un haz de luz en dos, creando una diferencia de camino óptico (OPD) (retardo de tiempo entre los haces) y se une a las vigas de nuevo para interferir en el detector. Cuando la intensidad se mide como una función de muchos OPD, se forma un patrón llamado un interferograma, el cual es único para un cierto

espectro. Posteriormente, al interferograma se le aplica la transformada de Fourier para lograr determinar el espectro. Este método tiene la ventaja de que la intensidad a cada longitud de onda es constante a lo largo de toda la duración de la medición. También permite seleccionar la resolución espectral requerida sin ningún cambio en el hardware, sólo se tiene que ajustar los parámetros de adquisición específicos. Por otro lado, una desventaja es que el espectro completo debe ser recogido, incluso si sólo se necesita un pequeño número de puntos de propagarse a lo largo del rango espectral. [2]

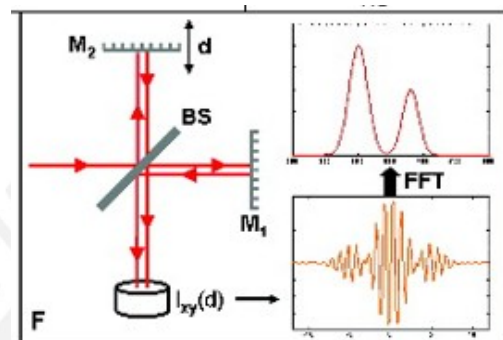


Figura 2.6. Espectroscopia de fourier. [2]

### 2.1.2 Cámaras multiespectrales comerciales.

Actualmente, en el mercado se cuenta con diversas cámaras para poder realizar un análisis multiespectral. Entre las cámaras comerciales del fabricante PIXELTEQ se encuentran la Spectrocam y la Pixelcam.

#### A. Spectrocam | VIS-NIR.

El sistema SpectroCAM multiespectral de imágenes (MSI) ofrece una plataforma flexible sofisticada para el desarrollo y despliegue de varias aplicaciones MSI. Diseñado para reducir los tiempos de desarrollo y simplificar el ciclo de diseño, SpectroCAM cuenta con una alta velocidad, la rotación continua de la rueda de filtro que contiene 8 filtros ópticos intercambiables; combinados con la matriz CCD de grado científico, este diseño de filtro crea una totalmente configurable, cámara totalmente portátil, de alta velocidad de MSI. Con desplazamiento de píxeles mínimo y alta velocidad de fotogramas, este sistema dinámico es una poderosa herramienta de desarrollo de productos. [5]

Los sistemas SpectroCAM están disponibles en un formato completo con lente, 8 filtros intercambiables y software de adquisición que se puede utilizar para la investigación innovadora espectroscopia 2D en una variedad de campos, incluyendo la medición de la calidad del agua, la selección de productos, la

visión por ordenador, imágenes médicas, vigilancia y autenticación de llave en mano. El sistema también se puede personalizar para su integración en productos específicos. [5]

Especificaciones:

- Sensor sensible desde VIS(banda de luz visible) hasta NIR(banda cercana al infrarrojo)
- Resolución: 1392 x 1040
- 20 fps a la máxima resolución.
- 8 filtros ópticos intercambiables.



Figura 2.7. Cámara Spectrocam. [5]

### B. PixelCam.

La cámara multiespectral PixelCam proporciona imágenes en una cantidad de bandas espectrales que varía entre 3 y 9 bandas. Esta cámara permite la adquisición de datos en tiempo real sin necesidad de cambio de escena o de desplazamiento de píxeles. Matrices de filtro personalizado se integran en el conjunto de plano focal a nivel de oblea para crear sensores lineales y de área robustos que extraen la información espectral en longitudes de onda visibles e infrarrojas específicas. [6]

Las cámaras PixelCam se fabrican con longitudes de onda definidas por el usuario. La combinación única de alta velocidad de imágenes multibanda y pequeño factor de forma la hace compatible con una variedad de aplicaciones dedicadas, incluyendo la agricultura, la biomedicina, visión artificial, la vigilancia y la autenticación y sistemas no tripulados. Módulos de cámara PixelCam estándar están disponibles para 3 y 4 bandas SWIR (Short Wave Infrared). [6]



Figura 2.8. Camara Pixelcam. [6]

### 2.1.3. Tecnología Nacional.

Asimismo, en la Pontificia Universidad Católica del Perú se realizó una cámara multiespectral para el sensado remoto en agricultura de precisión. Para ese proyecto se utilizaron cámaras Point Grey Firefly MV. En el proyecto se necesitaba capturar imágenes con longitud de onda en el espectro visible (650nm) y cercano al infrarrojo (850nm). Para lograr esto se utilizaron dos de las cámaras antes mencionadas con sus respectivos filtros ópticos y lentes, cada uno, con su respectiva interfaz electrónica. [3]

### 2.2. Hipótesis.

Para poder mejorar el proceso de monitoreo de los cultivos se utilizará una cámara multiespectral con la cual se podrá obtener de forma remota información de los cultivos.

### 2.3. Fundamento Teórico.

A continuación se definirá algunos conceptos .

#### 2.3.1. Agricultura de precisión.

La Agricultura de Precisión es considerada como un Sistema Alternativo Sostenible, utilizado en la producción agropecuaria, en el cual se emplean diferentes métodos o herramientas tecnológicas como por ejemplo, los Sistemas de Posicionamiento Geoespacial (GPS) y la Electrónica. Con el propósito de recopilar información sobre lo que sucede o puede suceder en los suelos y en los cultivos y, con dicha información, poder proceder a la toma de decisiones, que permita el incremento de los rendimientos, la disminución de los costos de producción y la reducción de los impactos ambientales.[2]



### 2.3.2. Percepción Remota.

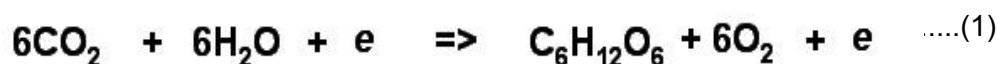
La percepción remota (PR) ha sido definida de varias maneras. En general, la PR es un grupo de técnicas para recolectar información sobre un objeto o área sin tener que estar en contacto físico con el objeto o área. Las distancias que separan al sensor del objeto o área estudiada pueden variar desde unos pocos metros hasta miles de kilómetros. Los métodos más comunes para recoger información incluyen el uso de sensores colocados sobre aviones o sobre satélites. [24]

### 2.3.3. Imagen multiespectral.

Una imagen multiespectral es una imagen que captura la información en determinadas longitudes de onda. Para lograr esto, se utilizan filtros o instrumentos que son sensibles a longitudes de onda particulares. Una imagen espectral puede permitir la extracción de la información que el ojo humano no logra captar con sus receptores para el rojo, verde y azul. Es por esto que estas imágenes multiespectrales se utilizan en diversas áreas como la arqueología, agricultura de precisión, entre otras. [1]

### 2.3.4. Bandas de interés en análisis multiespectral.

Toda la vida en nuestro planeta es impulsada por la energía que se almacena en los enlaces químicos de las moléculas de hidratos de carbono (por ejemplo, moléculas de azúcar) que contienen. En las plantas, los hidratos de carbono se producen mediante la combinación de la luz, dióxido de carbono y agua en un proceso químico llamado fotosíntesis. La ecuación general para este proceso es la que se muestra a continuación.



carbon dioxide + water + absorbed EM radiation  $\Rightarrow$  glucose + oxygen + reflected EM radiation

Cuando las plantas se mueren, la cantidad de radiación roja que refleja se incrementa. La radiación infrarroja cercana en las bandas entre 700 y 1000nm se refleja fuertemente cuando la vegetación está sana, cosa que no sucede cuando la vegetación se enferma tal como se observa en la figura 2.9. En los sistemas de formación de imágenes multiespectrales, la proporción de la radiación reflejada en el infrarrojo cercano a la radiación de color rojo se utiliza como un excelente indicador de estrés de la planta. Es por esto, que la banda roja e infrarroja cercana son importantes en el análisis multiespectral. Adicionalmente, las bandas verde y la banda entre 750nm y 800nm.[30]

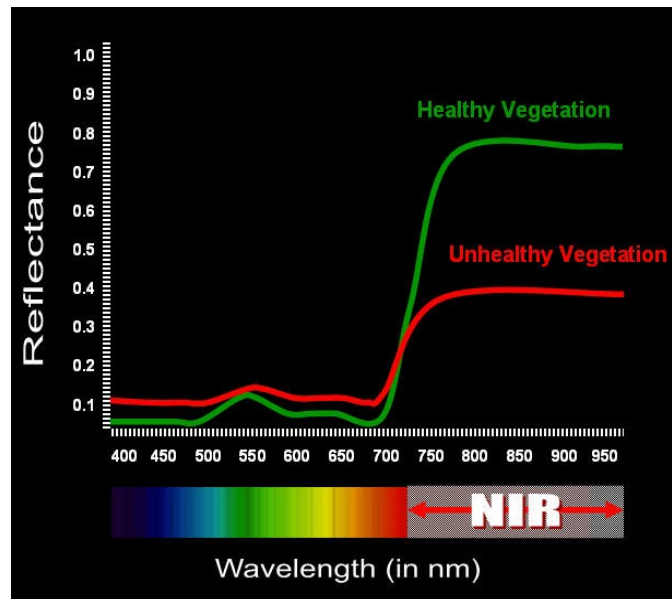


Figura 2.9. Grafico de Reflectancia(Reflectance) vs Longitud de onda(wavelength)[30]

#### 2.3.4. Espectro Visible.

El espectro visible es la porción del espectro electromagnético que es perceptible al ojo humano. La radiación electromagnética en este rango de longitudes de onda se llama luz visible o simplemente luz. Un ojo humano típico presenta una sensibilidad a longitudes de onda de aproximadamente 390 a 750 nm. En términos de frecuencia, esto corresponde a una banda en las proximidades de 400 a 790 THz. En general, un ojo de luz adaptado tiene su sensibilidad máxima en torno a los 555 nm (540 THz), en la región verde del espectro óptico. Los colores insaturados tales como rosa, o variaciones de color púrpura como magenta, están ausentes en el espectro debido a que sólo se pueden hacer por una mezcla de longitudes de onda.[12]

#### 2.3.5. Espectro del infrarrojo cercano.

Esa parte del espectro visible al ojo humano se extiende desde 400nm a 800nm, mientras que el espectro infrarrojo se extiende de aproximadamente 800nm a 1000um. El infrarrojo cercano es considerado esa parte del espectro situada entre la región visible y la región infrarroja. El rango de longitudes de onda que el NIR cubre, está entre 750nm a 2600nm. [13]

### 2.3.6. Factor NDVI.

El Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) sirve básicamente para medir el crecimiento de las plantas, determinar cubiertas vegetales y controlar la producción de biomasa. Las cámaras digitales que se utilizan en agricultura de precisión obtienen información principalmente de dos regiones del espectro electromagnético, concretamente del rojo y del infrarrojo cercano (este último no visible por el ojo humano). Pues bien, el NDVI se calcula a partir de la información obtenida del rojo y del infrarrojo cercano, con la siguiente fórmula: [11]

$$\text{NDVI} = (\text{infrarrojo cercano} - \text{rojo}) / (\text{infrarrojo cercano} + \text{rojo}) \dots \dots \dots (2)$$



Figura 2.10. Imagen de muestra. [11]

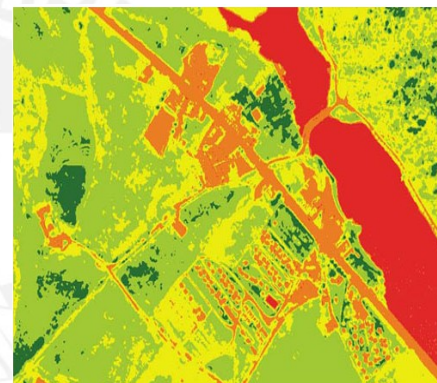


Figura 2.11. Imagen con NDVI. [11]

## CAPÍTULO 3

### PLANTEAMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE UNA CÁMARA MULTIESPECTRAL

En el presente capítulo se exponen los objetivos de la investigación, así como también los requerimientos que debe cumplir el sistema. Además, se expondrá las alternativas que se tienen para lograr la ejecución del proyecto.

#### **3.1. Objetivos de la investigación.**

Se mencionarán los objetivos principales así como los objetivos específicos.

##### **3.1.1. Objetivo principal.**

Desarrollar una cámara multiespectral de cuatro bandas con la cual se pueda capturar imágenes en cuatro longitudes de ondas distintas y que estas imágenes puedan ser utilizadas para poder conocer características del cultivo tales como el estrés del cultivo o su nivel de nitrógeno y clorofila.

##### **3.1.2. Objetivos específicos.**

- 1) Diseñar un mecanismo para intercambiar los filtros a la cámara.
- 2) Diseñar una cámara multiespectral de bajo costo que pueda ser usada en la agricultura.
- 3) Diseñar un sistema que pueda almacenar las imágenes tomadas por la cámara.
- 4) Mejorar diseños anteriores desarrollados en la PUCP.

#### **3.2 Requerimientos mínimos**

El sistema debe cumplir con los siguiente requerimientos para que sea utilizado en una aeronave no tripulada:

1. Dimensiones máximas de 20cm x 20 cm con una altura de 15cm .
2. Potencia máxima de 3 W.
3. Peso máximo de 2kg.

#### **3.3 Diagrama de bloques**

Para lograr los objetivos mencionados anteriormente, el sistema debe ser formado por distintas partes, las cuales se muestran en la figura 3.1.

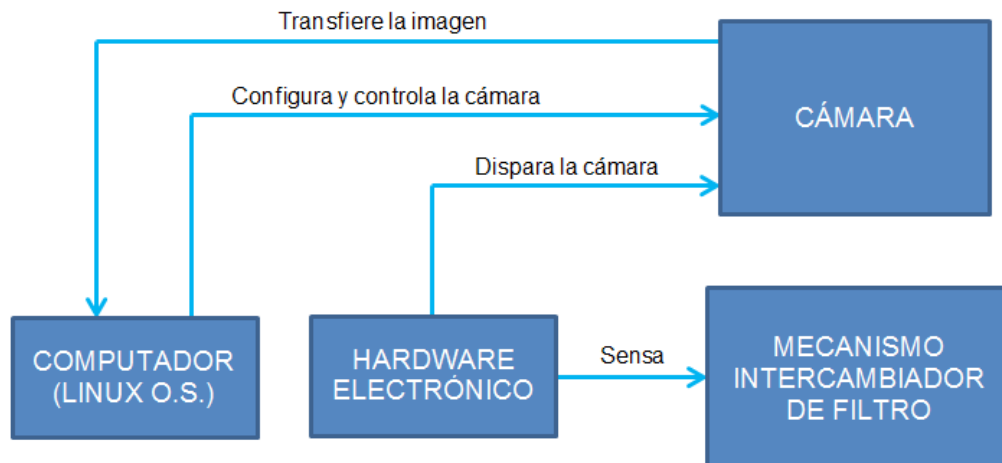


Figura 3.1. Diagrama de bloques del sistema

En esta parte se buscará encontrar cada una de las partes que se mencionan en el diagrama de bloques. La alternativa que se escoja debe ser la que presente un menor costo y ocupe el menor espacio.

### 3.3.1. Mecanismo intercambiador de filtros.

#### A. Mecanismo rotatorio.

El mecanismo rotatorio consiste en tener una superficie circular en el cual se ubicaran los 4 filtros necesarios. El diseño a realizar es similar al que se muestra en la figura 3.2. sin embargo solo tendrá 4 filtros separados de forma uniforme



Figura 3.2. Filtro rotativo de 8 filtros. [9]

Este mecanismo rotativo debe usar un motor que haga que este gire y ubique el filtro en la posición en la que se encuentra el lente de la cámara. Para esto se puede usar un motor dc o un motor a pasos.



### Motor DC y Motor a pasos:

Accionar un motor DC es muy simple y solo es necesario aplicar la tensión de alimentación entre sus bornes. Para invertir el sentido de giro basta con invertir la alimentación y el motor comenzará a girar en sentido opuesto. [14]

Los motores a pasos son muy utilizados en la actualidad para el desarrollo de mecanismos que requieran de una alta precisión. Este tipo de motores poseen cualidades especiales por el hecho de poder mover desde un paso hasta una secuencia interminable de pasos dependiendo de la cantidad de pulsos que se les aplique. Este paso puede ir desde pequeños movimientos de  $1,8^\circ$  hasta de  $90^\circ$ . Es por eso que este tipo de motores son muy utilizados, ya que pueden moverse a deseo del usuario según la secuencia que se les indique a través de un microcontrolador. [15]

A diferencia de los motores paso a paso y los servomecanismos, los motores DC no pueden ser posicionados y/o enclavados en una posición específica. Estos simplemente giran a la máxima velocidad y en el sentido que la alimentación aplicada se los permite. [14]

El motor tendrá que hacer girar una plataforma cuyo peso será como máximo 50 g, y tendrá un radio igual a 6 cm. Además, la velocidad de giro será de 800 ms. Con estos datos se calcula el torque necesario del motor.

Se sabe que el torque es igual a la aceleración angular multiplicado por el momento de inercia. La aceleración angular guarda relación con el tiempo que le toma recorrer cierto angulo; en este caso, una vuelta entera. El momento de inercia será igual a la mitad de la masa por el radio al cuadrado.

$$\text{Aceleración Angular} = 2\pi / (0,8 \text{ seg})^2$$

$$\text{Momento de Inercia} = 0,5 \cdot 0,05 \text{kg} \cdot (0,06 \text{m})^2$$

$$\text{Torque} = 0.0017 \text{ N.m} = 1,76 \text{ mN.m}$$

Entonces, el motor deberá tener un torque mínimo de 1.76 mN.m.

En las figuras 3.3 y 3.4 se muestra un motor DC y motor a pasos comercial.





Figura 3.3. Motor DC [10]



Figura 3.4. Motor a pasos. [10]

Tabla 3.1. Tabla comparativa de motores [10]

	Motor DC	Motor a pasos
VOLTAJE	5V	5v
RPM o Pasos por Vuelta	7796 RPM	20 pasos por vuelta
Torque	2.4 mN.m	10 mN.m
PRECIO	3.95 USD	26.78 USD

Filtros:

En este caso, se tiene que utilizar 4 filtros circulares que serán distribuidos cada 90° en el disco giratorio. Para las aplicaciones en agricultura los filtros que se usan están en las siguientes longitudes de onda: 850nm(NIR), 750nm(NIR), 650 nm(Rojo) y 550nm(Verde).



Figura 3.5. Filtro óptico circular. [16]

Filtro de infrarrojo cercano(NIR)(850 nm): Filtros de paso de banda infrarrojo cercano (NIR) óptica proporcionan una transmisión precisa de bandas espectrales NIR específicos, mientras que el bloqueo de las señales fuera de la

banda de longitudes de onda superiores e inferiores. El infrarrojo cercano se extiende desde 700-1100 nm, más allá de la visión humana, pero aún dentro de la capacidad de respuesta normal del silicio (Si), que se usa en los sensores.[17] [29]

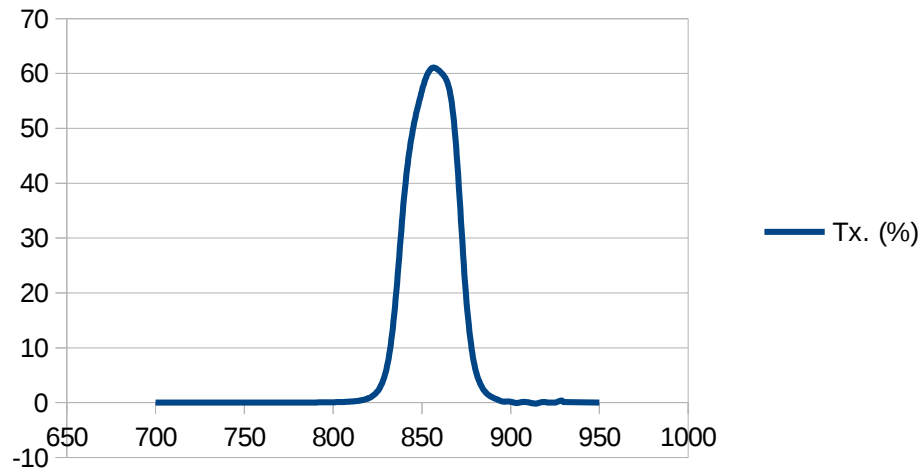


Figura 3.6. Filtro NIR [29]

Filtro de rojo esquina (750nm):

Este filtro es conocido como red edge se encuentra en el borde entre el rojo e infrarrojo cercano y es una banda importante para las imágenes multiespectrales para agricultura de precisión. [29]

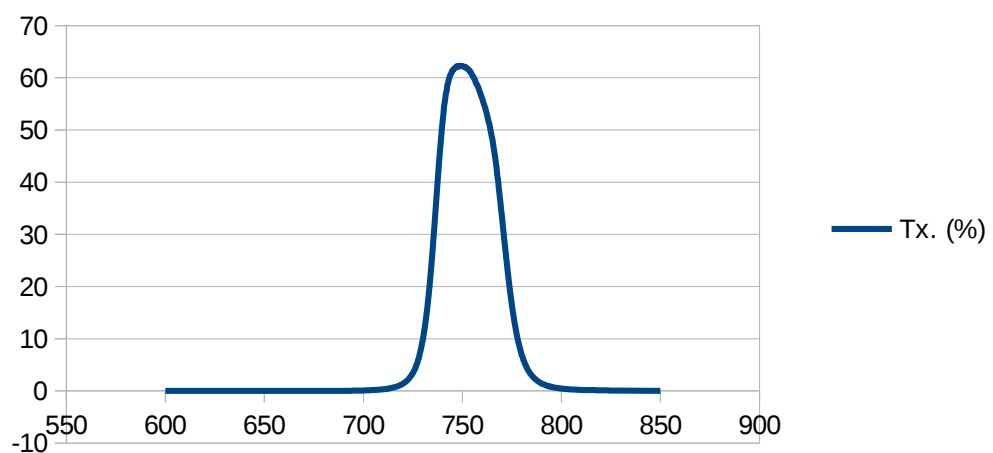


Figura 3.7. Filtro de banda 750nm[29]

Filtro de banda roja(650 nm):

El filtro de banda roja transmite sólo las longitudes de onda más larga de color rojo visible y refleja las longitudes de onda visibles cortos. [17][29]

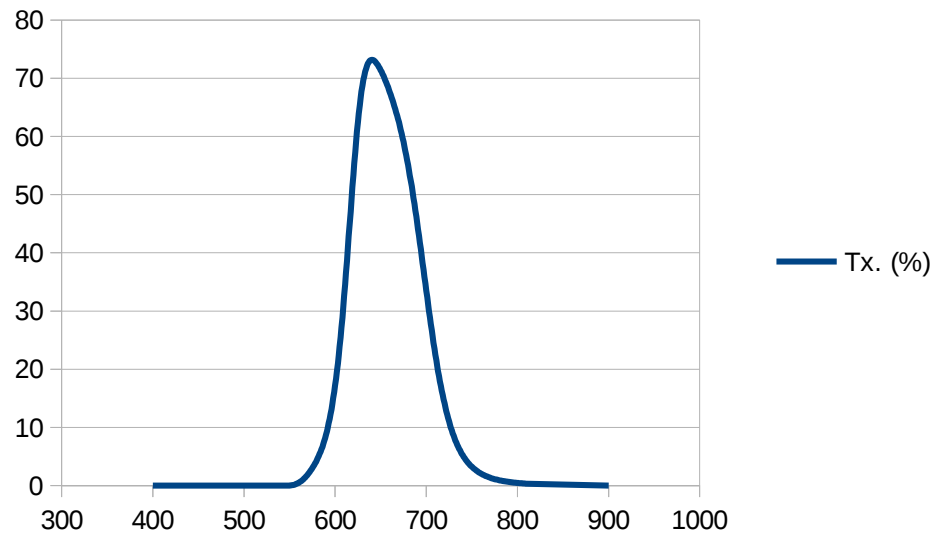


Figura 3.8. Filtro de banda roja [29]

Filtro de banda verde(550nm):

El filtro de banda verde transmite sólo las longitudes de onda más larga de color verde visible y refleja las longitudes de onda visibles cortos. [17][29]

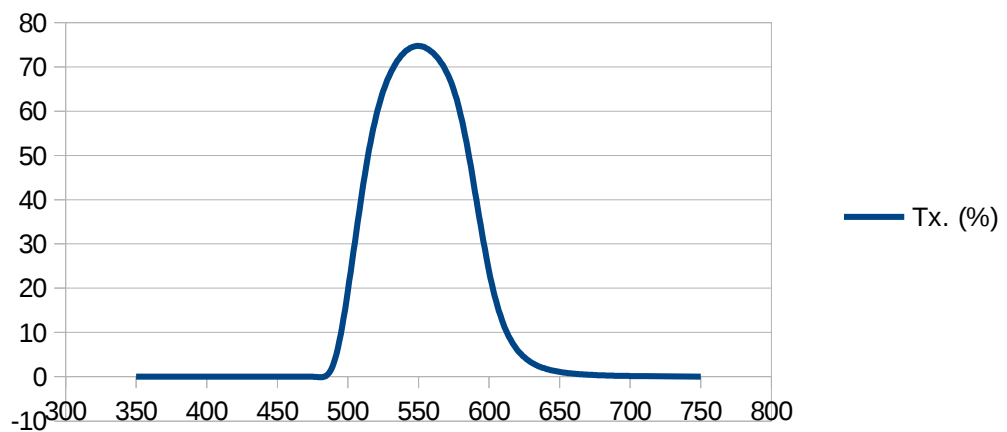


Figura 3.9. Filtro de banda verde [29]

### B. Mecanismo que se desplaza linealmente.

En este mecanismo se desplaza un filtro lineal variable en línea recta para obtener fotografías a las que se le aplica un filtro distinto. Para la realización de este mecanismo se requiere un motor de mucha precisión por lo cual sería mejor utilizar un motor a pasos con sus respectivos drivers para lograr el mecanismo deseado.

Filtro Lineal Variable:

Este filtro tiene una longitud de onda central ajustable y paso de banda ajustable. Cada filtro dispone de una banda de transmisión de aproximadamente 90% y la banda de bloqueo de aproximadamente 99,8%. [17]

Estos filtros permiten mover la transmisión o el bloqueo de banda en toda la gama de longitud de onda 300-750 nm. Tiene un precio de 600 USD. [17]



Figura 3.10. Filtro lineal variable [17]

### 3.3.2. Computador

Un computador deberá poder comunicarse con la cámara y configurarla de la forma en que se desee y poder almacenar las imágenes. Las imágenes deberán permanecer en la memoria para que posteriormente sean procesadas.

#### A. Raspberry Pi.

Este dispositivo es un pequeño ordenador basado en arquitectura ARM que puede ser utilizado en proyectos de electrónica, y para muchas de las cosas que una PC de escritorio puede realizar tal como hojas de cálculo, procesadores de texto y juegos. También reproduce vídeo de alta definición. Este microcomputador es compacto e incorpora lo necesario para poder correr un Linux. La frecuencia del procesador del equipo es de 700 MHz y tiene una memoria de 256 MB. [18][19]



Figura 3.11. Raspberry Pi. [18]

### B. Beaglebone Black

El Beaglebone es una plataforma de desarrollo de bajo costo que tiene las dimensiones de una tarjeta de crédito. El Beaglebone black difiere ligeramente de la versión regular que le proporciona un puerto micro HDMI a bordo, 512 MB de DRAM DDR3L, 4 GB de memoria interna flash, un procesador AM3358 a 1GHz. Por último, esta plataforma es muy usada para pequeñas aplicaciones embebidas.[25]

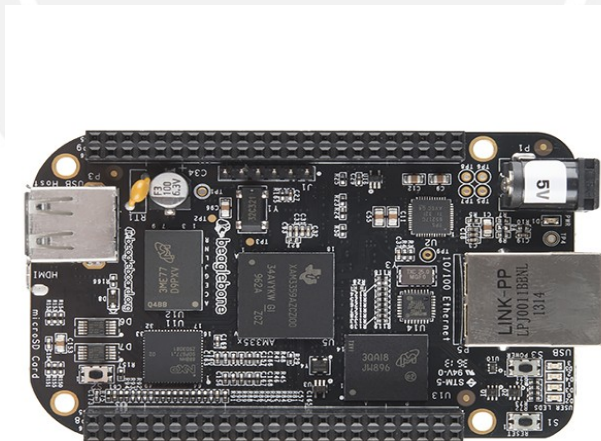


Figura 3.12. Beaglebone black. [25]

En la tabla 3.2. se muestra las características de ambos computadores.

Tabla 3.2. Características de los computadores. [25]

	Beaglebone	Raspberry
Procesador	AM3358 ARM® Cortex™-A8	ARM1176JZFS
Frecuencia de CPU	1Ghz	700 Mhz
Dimensiones	86.36mm x 54.61mm	85.60mm x 53.98mm x 17mm
Memoria	4 GB	Necesita SD
Alimentación	5V-Mini USB,USB o DC Jack	5V-Micro USB
Sistema Operativo	Linux	Linux
Peso	39 g	45 g
Precio	99 USD	80 USD

### 3.3.3. Cámara.

Una parte importante para la realización del proyecto es la cámara. Esta cámara debe tener la opción de poder ser disparada por un trigger externo y debe ser de dimensiones pequeñas.

#### A. Firefly MV 0.3 MP USB2.0.

La cámara Firefly USB 2.0 del fabricante Point Grey es accesible y fiable de solución para proyectos sobre adquisición de imágenes. Posee un sensor de alta sensibilidad Micron MR9V022 CMOS, y combinado con la alta velocidad de USB 2.0 , hace que la Firefly sea una buena opción para aplicaciones con imágenes.[22]



Figura 3.13. Cámara Firefly MV 0.3 USB 2.0. [22]



### B. Chameleon 1.3 MP USB 2.0.

La cámara Camaleón USB 2.0 del fabricante Point Grey es una completa , rentable y fiable de solución para proyectos sobre adquisición de imágenes. Posee un sensor se alta sensibilidad Sony EXview TENÍA CCD, y combinado con la alta velocidad de USB 2.0 , hace que la Chameleón sea una buena opción para aplicaciones con imágenes.[22]



Figura 3.14. Cámara Chameleon 1.3 MP USB 2.0 [22]

### C. Raspberry Pi Camera - NOIR

Este módulo esta creado para trabajar directamente con el raspberry Pi. Este modelo difiere del Pi Camera debido a que este no posee un filtro infrarrojo, lo cual lo hace ideal para aplicaciones en las cuales se necesite esta longitud de onda.[22][18]



Figura 3.15. Raspberry Pi Camera – NOIR.[22]

En la tabla 3.3 se realiza una comparación entre las cámaras.

Tabla 3.3. Tabla comparativa de cámaras.[22]

	FireFly MV	Chameleon	Raspberry Pi Camera-NOIR
Requerimientos de Hardware	Computador con Linux	Computador con Linux	Raspberry
Dimensiones	24.4 x 44 x 34 mm	25.5 x 44 x 41 mm	25 x 20 x 9mm
Resolución	0.3 MP	1.3 MP	5 MP
Cuadros por segundo	60 FPS	16 FPS	60 FPS
Precio	275 USD	375 USD	60 USD

### 3.4. Comparación entre las alternativas.

En primer lugar, se utilizará un mecanismo rotatorio para lograr intercambiar los filtros de la cámara. Se elige este mecanismo debido a que este utiliza filtros ópticos que tienen un precio menor; en cambio, el otro mecanismo, utiliza un filtro lineal variable cuyo costo es de 6 veces el costo de los filtros utilizados en el mecanismo rotatorio. Además, la utilización del filtro lineal variable es más complicada con respecto al filtro circular, y se necesitaría una circuitería de control compleja, lo que traería como consecuencia un mayor tamaño, peso y costo.

En segundo lugar, el motor que se encargará de hacer girar al grupo de filtros será un motor DC debido a que se busca que la plataforma gire rápido. Además, el motor DC es más fácil de utilizar debido a que solo necesita que se le energice con un voltaje constante para girar a una cierta velocidad; en cambio, el motor a pasos necesita de un driver para su correcto funcionamiento.

Por otro lado, con respecto a la unidad de procesamiento y la cámara, aún existe la incertidumbre por saber cuál es la adecuada para el proyecto. Por el lado económico, se elegiría el raspberry pi con la picamera. Sin embargo, no existe la seguridad de lograr los objetivos con esta elección. Por otro lado, se tiene al beaglebone con una de las cámaras de point grey (firefly mv o chameleon). Se evaluarán ambas opciones, y se elegirá la adecuada.

Para evaluar ambas opciones lo primero que se realizó es el disco en el que se montarán los filtros. Mediante un software de diseño de piezas 3D OpenSCAD, se desarrolló un disco como el mostrado en la figura 3.14.

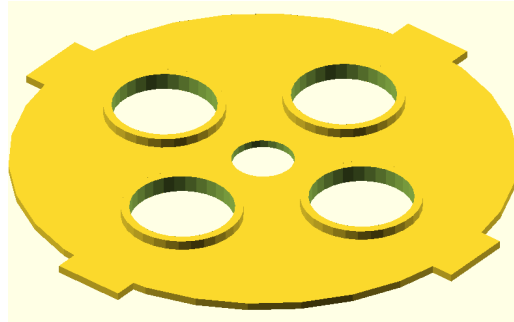


Figura 3.16. Disco rotatorio.

El disco diseño junto con los filtros tiene un peso de 30 g, por lo cual el torque necesario del motor será 1,05 mN.m, por lo que el motor que fue elegido para este diseño si cumple con los requerimientos.

Luego, se tendrá una distribución para evaluar las 2 opciones.

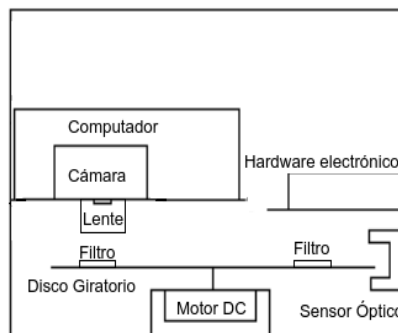


Figura 3.17. Distribución de componentes.

Además, se desarrolla el hardware electrónico, el cual sensorará cuando cada uno de los filtros pase por debajo del lente de la cámara. Para lograr esto, se utilizará un sensor óptico de barrera el cual detectará cuando uno de los bordes sobresalientes del disco pase a través de este y se tendrá un pulso el cual deberá disparar a la cámara.



Figura 3.18. Sensor óptico de barrera.[10]

### A. Opción 1: Raspberry Pi y Pi Camera.

En esta opción, lo primero que se realizó fue la instalación del sistema operativo Arch Linux en el raspberry, debido a que es una distribución de Linux que trata de ser simple, solo cuenta con lo básico y a partir de ahí cada usuario lo modifica según sus necesidades; por ejemplo, el Arch Linux necesita que se le instale una interfaz gráfica si se requiere. Es por ello, que al poseer este sistema operativo, el raspberry trabaja con un mejor rendimiento para las necesidades del proyecto y nos ayuda a desarrollar sistemas embebidos. El sistema operativo se encuentra en una memoria SD. Para la instalación se deben seguir los siguientes pasos.

#### 1. Particionar la memoria:

```
fdisk /dev/sdX
```

#### 2. Borrar particiones antiguas y crear una nueva:

1. Escribir **o**. Borrará las particiones.
2. Escribir **p**. Listará las particiones, no debe haber ninguna.
3. Escribir **n**, luego **p** para primary, **1** para la primera partición, presionar ENTER para aceptar, luego escribir **+100M** para el último sector.
4. Escribir **t**, luego **c** para que sea del tipo W95 FAT32 (LBA).
5. Escribir **n**, luego **p** para primary, **2** para la segunda partición, presionar ENTER dos veces para aceptar.
6. Para salir presionar **w**.

#### 3. Crear y montar el FAT filesystem:

```
mkfs.vfat /dev/sdX1 mkdir boot mount /dev/sdX1 boot
```

#### 4. Crear y montar el ext4 filesystem:

```
mkfs.ext4 /dev/sdX2 mkdir root mount /dev/sdX2 root
```

#### 5. Descargar y extraer el root filesystem (como root, no usando sudo):

```
wget http://archlinuxarm.org/os/ArchLinuxARM-rpi-latest.tar.gz bsdtar -xpf ArchLinuxARM-rpi-latest.tar.gz -C root sync
```

#### 6. Mover boot files a la primera partición:

```
mv root/boot/* boot
```

7. Desmontar las 2 particiones:  
umount boot root

8. Insertar la memoria SD y energizar el Raspberry Pi. [26]

Luego se debe conectar a internet via wifi para poder tener acceso remoto desde una computadora. Los pasos para conectarse a internet son los siguiente:

1. Instalar las herramientas necesarias:

```
pacman -Syu
pacman -S wireless_tools
```

2. Mostrar las conexiones disponibles

```
ip link
```

3. Debe aparecer una conexión llamada wlan0

4. Activar la conexión:

```
ip link set wlan0 up
```

5. Buscar las redes disponibles

```
iwlist wlan0 scan
```

6. Se encuentra la red, en caso ser redpuc, se escribe lo siguiente:

```
wpa_passphrase redpucp "C9AA28BA93" > /etc/wpa_supplicant.conf
```

7. Para conectarnos se escribe lo siguiente:

```
wpa_supplicant -iwlan0 -c /etc/wpa_supplicant.conf & dhcpcd wlan0
```

[27]

Una vez que se tiene todo esto se procede a conectarse por medio del protocolo ssh desde una computadora. Se escribe ssh root@dirección ip y se tiene acceso al raspberry.

Se desarrolló 2 programas de prueba. Uno escrito en lenguaje Python y otro escrito en lenguaje C.

Luego de ejecutar el programa escrito en Python en el cual se realizaban interrupciones al programa por flanco de bajada se obtuvo lo siguiente.

```

root@alarmpi:~
t.
Connection to 192.168.1.33 closed.
tony@tony-Lenovo:~$ ssh root@192.168.1.33
root@192.168.1.33's password:
Welcome to Arch Linux ARM

      Website: http://archlinuxarm.org
      Forum: http://archlinuxarm.org/forum
      IRC: #archlinux-arm on irc.Freenode.net
Last login: Mon Sep 29 03:12:17 2014 from 192.168.1.35
[root@alarmpi ~]# ls
CMakeLists.txt          blink.py                interrup.c              raspicam-0.0.5
Rpi.GPIO-0.5.6         camcv                  mmalincludes.h        raspicam-0.0.5.tgz
Rpi.GPIO-0.5.6.tar.gz  camera.h               newproj                userland-master.zip
bcm_host.h              camera.py               picamdemo
blink                   images                  prueba.py
blink.c                 interrup                prueba01
[root@alarmpi ~]# python prueba.py
1
[root@alarmpi ~]# python prueba.py
Traceback (most recent call last):
  File "prueba.py", line 12, in <module>
RuntimeError: Error #3 waiting for edge
[root@alarmpi ~]#

```

Figura 3.19. Resultado de programa en Python.

El error obtenido es debido a que las interrupciones solo podían suceder 1000 veces, luego de esto, el programa se detenía inmediatamente. Por estos motivos se descartó el programa en Python.

Después, se realizó las pruebas en lenguaje C con el cual no se tuvo problemas con el número de interrupciones. En la imagen se observa que se realizaron 6388 interrupciones sin ningún problema.

```

root@alarmpi:~
6356
6357
6358
6359
6360
6361
6362
6363
6364
6365
6366
6367
6368
6369
6370
6371
6372
6373
6374
6375
6376
6377
6378
6379
6380
6381
6382
6383
6384
6385
6386
6387
6388
^C[root@alarmpi ~]#

```

Figura 3.20. Resultado del programa en C.

Luego de realizado este experimento, se procedió a tomar una foto cada vez que exista un pulso de bajada. Al realizar este experimento se pudo observar que el tiempo que tomaba la toma de 1 foto era de aproximadamente 3 segundos lo cual era demasiado lento para los objetivos del proyecto. Por esta razón se descarta esta opción.



## B. Opción 2: Beaglebone y Camara de Point Grey.

En este caso, el beaglebone cuenta con el sistema operativo Debian y no es necesario instalarlo como en el caso del raspberry pi. El fabricante Point Grey, brinda software de prueba FlyCapture2 SDK con el que se pueden realizar ciertas acciones con la cámara tales como la toma de fotos. Para realizar las pruebas se conecta la camara al puerto usb que posee el beaglebone y se controla esta plataforma desde una laptop mediante ssh.

Se escribe `ssh root@192.168.7.2` y de esta forma se accede de forma remota a la plataforma.

Se realizó pruebas con el programa FlyCaptureTest con el cual se toma fotos. Al realizarse la prueba con la cámara Firefly MV no hubo ningún problema y el tiempo que demoraba la captura era más veloz que en el caso del raspberry. Se hablará mas a profundidad de tiempos en el siguiente capítulo. Sin embargo, al momento de ejecutar el mismo programa con la cámara Chameleon, no se lograba capturar fotos. Esto es debido a que esta camara requiere 2w de potencia los cuales no pueden ser entregados por el puerto USB del beaglebone. Como la FireFly MV requiere menos de 1w para su uso, no existiría ningun inconveniente para su utilización en este proyecto y sería la opción elegida para el desarrollo del proyecto.

Se realizó un diseño del chasis en el cual se encuentran distribuidos todos los elementos presentes en el proyecto. A continuación se muestra imagenes del diseño.

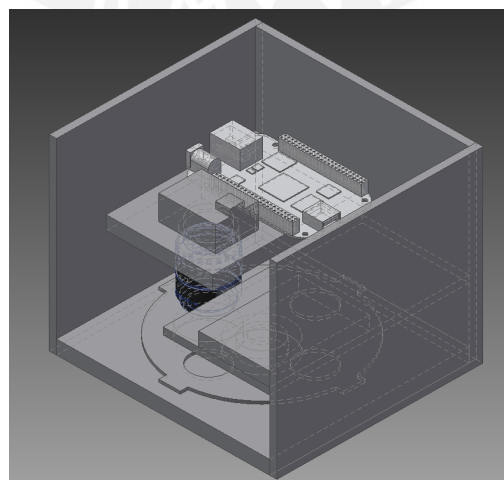


Figura 3.21. Distribución del proyecto, vista 1.

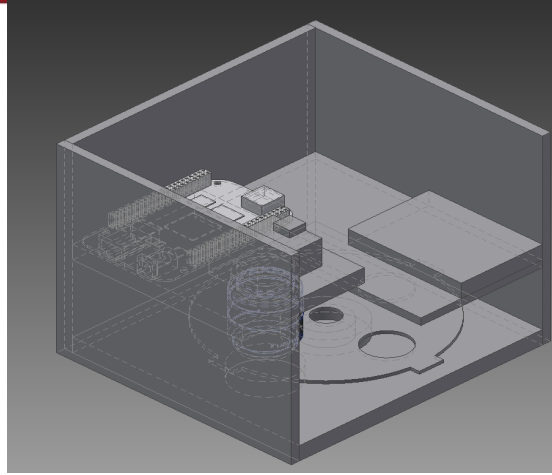


Figura 3.22. Distribución del proyecto, vista 2.

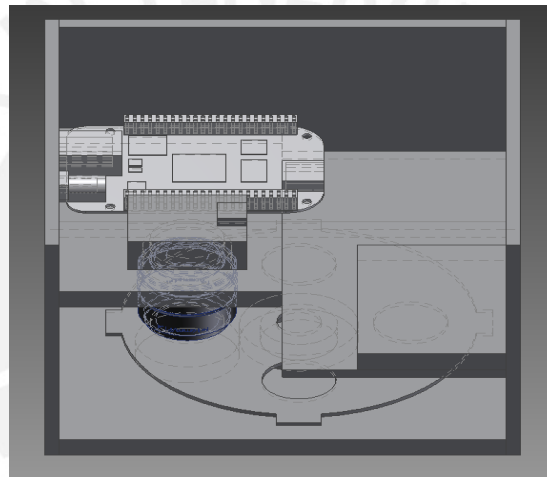


Figura 3.23. Distribución del proyecto, vista 3.

A continuación se explicará el hardware electrónico que se desarrolló.

En primer lugar, se diseñó un regulador de voltaje el cual nos permite obtener un voltaje de 3.3 V. Se requiere ese voltaje debido a que es el nivel de voltaje que se requiere los pines de la cámara. Un voltaje mayor causa daños en la cámara.

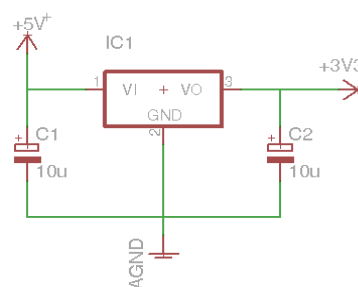


Figura 3.24. Diagrama esquemático del regulador de voltaje.

Además, se diseñó un circuito, el cual nos permita obtener una señal para poder disparar la cámara externamente. La señal que se genera debe ser un flanco de bajada. Para lograr esto se utilizó un sensor óptico de barrera, el cual era obstruido por los extremos sobresalientes del disco, cada vez que esto ocurría, se obtenía un flanco de subida a la salida del sensor. Como lo que se busca es un flanco de bajada, se utilizó un transistor de tal forma que invierta la señal y poder obtener la señal deseada.

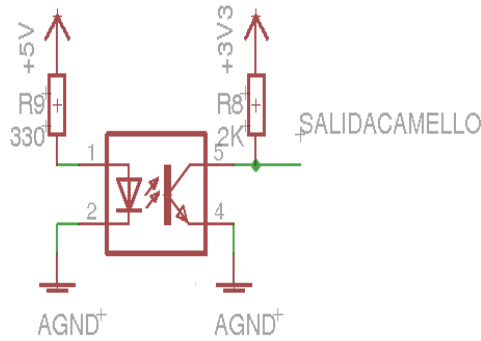


Figura 3.25. Diagrama Esquemático del sensor.

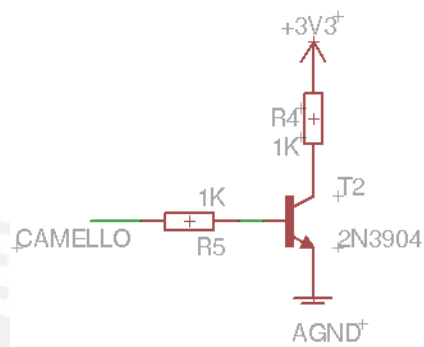


Figura 3.26. Diagrama Esquemático del inversor.

Por último, se diseñó un circuito que nos permita variar la velocidad de giro del motor, para de esta manera, adecuarlo a las pruebas que se necesiten realizar.

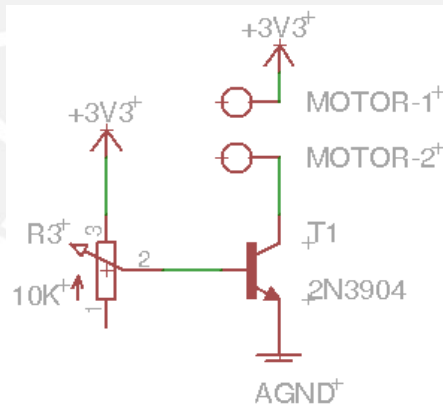


Figura 3.27. Diagrama esquemático del variador de velocidad del motor.

Para el desarrollo de este proyecto, se realizaron 2 tarjetas, una en la cual estaba ubicado solo el sensor optico de barrera (figura 3.28.), y otra en donde se encuentre todo lo mencionado anteriormente (figura 3.29.). La tarjeta en la cual se encuentra el sensor óptico debe ubicarse de tal manera de que el disco al girar pase por el sensor.



Figura 3.28. Tarjeta del sensor

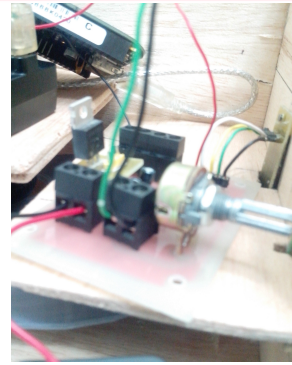


Figura 3.29. Tarjeta electrónica 2

A continuación se explicará sobre el programa que se desarrolló para la realización del proyecto.

Este programa se desarrolló en lenguaje C++ y es ejecutado en el BeagleBone, en el cual se encuentra conectado la cámara en su puerto USB.

En primer lugar, se realizó una modificación al programa FlyCaptureTest que brinda el fabricante. En este programa solo se guardaba una imagen luego de tomar varias fotos. Lo que se modificó fue que el programa capturaba un total de 10 imágenes. Con este programa se pudo realizar ciertas pruebas que se muestran en el siguiente capítulo.

Además, se realizó una programación para controlar la cámara de la forma en la que se requiere para la realización del proyecto. El programa estaba basado en dos programas que brinda el fabricante que son FlyCaptureTest y ExternalShutter. El programa activa el modo de trigger externo; es decir, configura a la cámara para que capture imágenes al recibir un pulso externo, el cual se lo brinda el hardware electrónico mencionado anteriormente. Luego que captura la imagen se procede a almacenarla con un nombre único. Esta acción se repite por un número determinado de veces que es predefinido en el programa. Una vez que termina de capturar todas las imágenes que se configuró, se desactiva el modo de trigger externo y se procede a apagar la cámara.

En la figura 3.30. se muestra el diagrama de flujo de la programación.

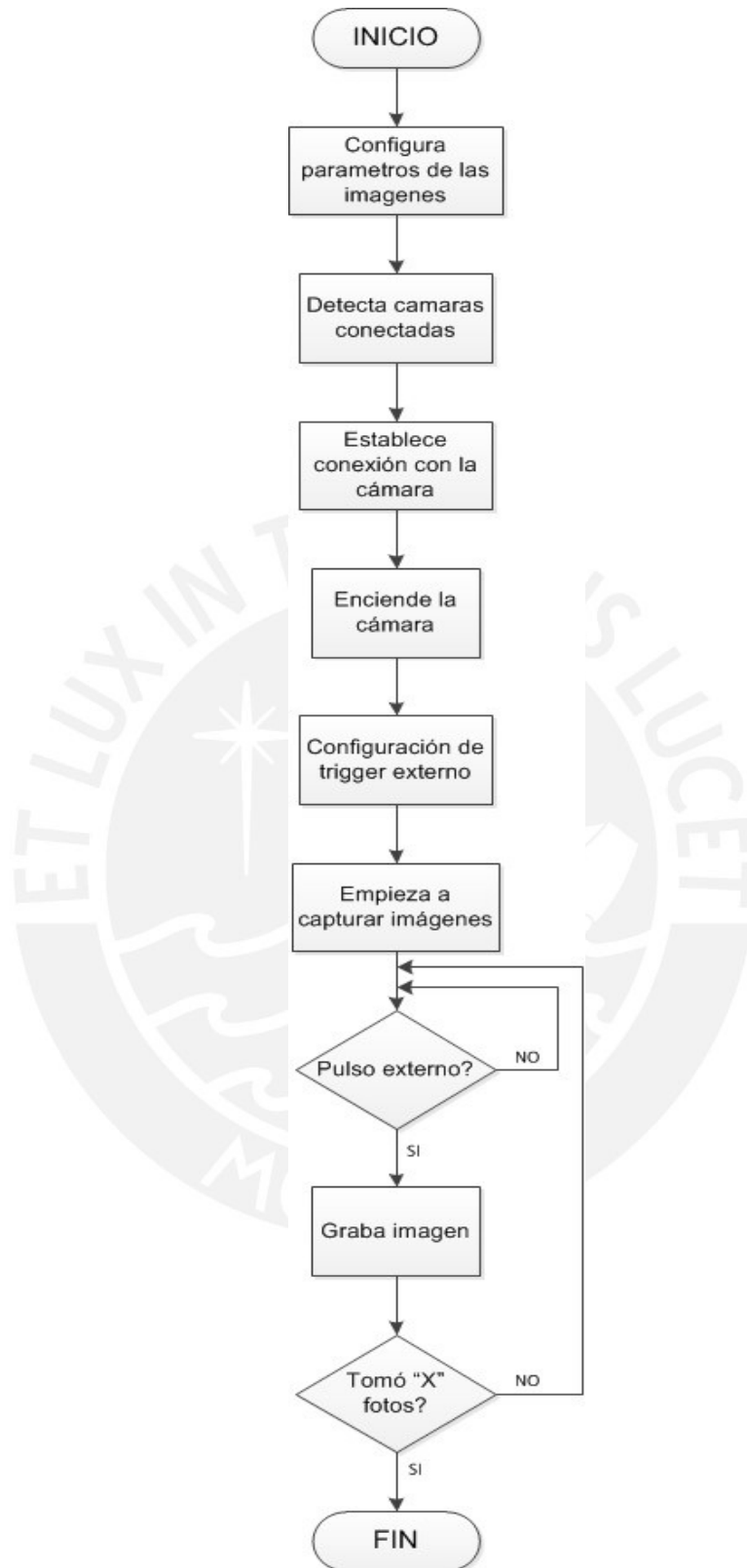


Figura 3.30. Diagrama de flujo.

## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se exponen todas las pruebas realizadas con la opción elegida en el capítulo anterior, así como también los resultados obtenidos.

#### **4.1. Pruebas de la cámara.**

El fabricante Point Grey brinda un driver para poder controlar la cámara, el cual puede ser instalado en el sistema operativo windows o linux. Además, el fabricante también brinda software de prueba dentro de un archivo llamado FlyCapture2 SDK. Dentro de estos programas se realizó pruebas con FlyCaptureTest. El FlyCapture Test es un programa escrito en C++ con el cual se toman varias fotografías pero solo se almacena la última. Se realizó una pequeña modificación al programa de tal manera que se capturara diez imágenes. Dentro de los resultados que se obtuvieron se pudo observar que en todas las ocasiones, las tres primeras fotos se obtenían desenfocadas.

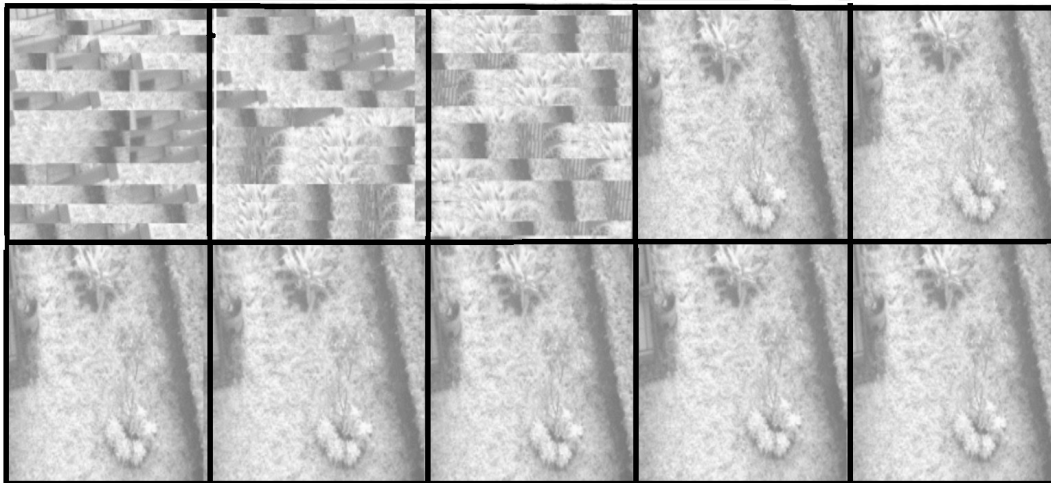


Figura 4.1. Imágenes capturadas con FlyCaptureTest.

Este tipo de problema no ocurre cuando se controla la cámara con una computadora de escritorio o una laptop. Es por ello que se concluye que el causante de esto es el beaglebone, el cual logra obtener correctamente la imagen a partir de la cuarta captura.

Luego, se realizó pruebas con otro programa llamado ExternalShutter, el cual sirve para realizar pruebas de los distintos modos de captura que existen y que fueron detallados en el anexo 2 del presente documento. Para la realización de esta prueba se utilizó un programa de prueba para el beaglebone. Este



programa se llama “blink an external LED”.[28] En este programa, un pin del GPIO del beaglebone se encontraba oscilando entre 3.3v y 0v a una frecuencia de 10 hz. La entrada del external shutter de la cámara se conectó al pin del beaglebone que se encontraba oscilando. De esta forma se pudo observar el funcionamiento del trigger externo de la cámara en modo 0.



Figura 4.2. Imagen de la segunda prueba.

#### 4.2. Pruebas del hardware electrónico.

Se realizaron pruebas para poder observar las señales a la salida del sensor, y luego de ser invertida por el transistor.

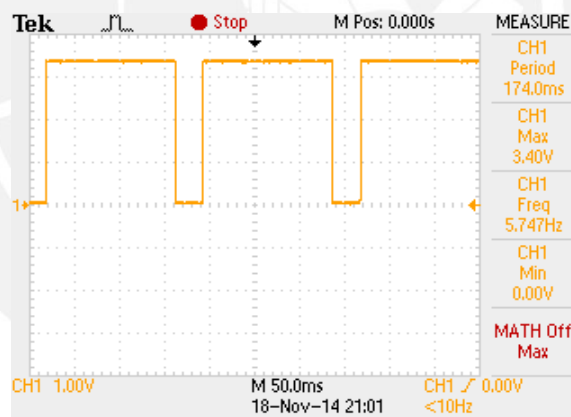


Figura 4.3. Prueba de señales en el sensor(salida del inversor).

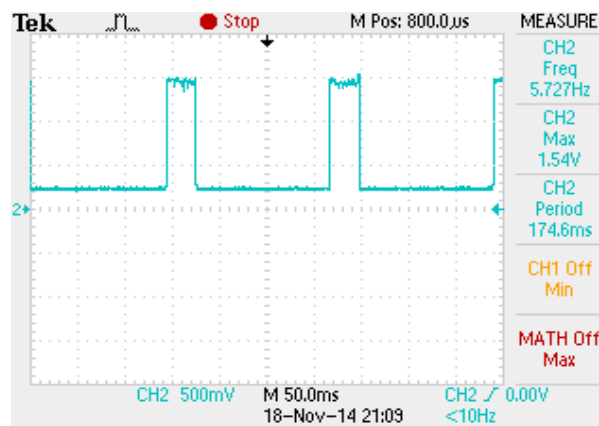


Figura 4.4. Prueba de señales en el sensor(salida del sensor óptico).

Además, se realizarán pruebas para ver el rango de velocidades que se pueden obtener. El resultado fue que con el circuito que varía la velocidad de giro, se logró obtener rangos de velocidad de 80RPM hasta 3000RPM.

Por último, se realizó una medición para saber el consumo total de corriente de este hardware, y mediante la ayuda de un multímetro se obtuvo que el consumo era de 60 mA.

#### 4.3 Pruebas integrales.

Para la realización de este diseño se utilizó una cámara del fabricante Point Grey, la cual era controlada por una plataforma beaglebone, la cual la configura para que capture imágenes al recibir una señal externa que se la brinda un hardware electrónico. Este hardware electrónico brinda la señal cuando cada uno de los filtros que se encuentran colocados en un disco giratorio se encuentren debajo del lente de la cámara.

Para estas pruebas se realizó la impresión 3D de un disco en el cual se colocan los filtros. Cabe resaltar que para las pruebas de este proyecto solo se trabajó con 2 filtros, el filtro rojo y el filtro infrarrojo cercano. Sin embargo, este disco puede alojar hasta 4 filtros sin ninguna complicación.

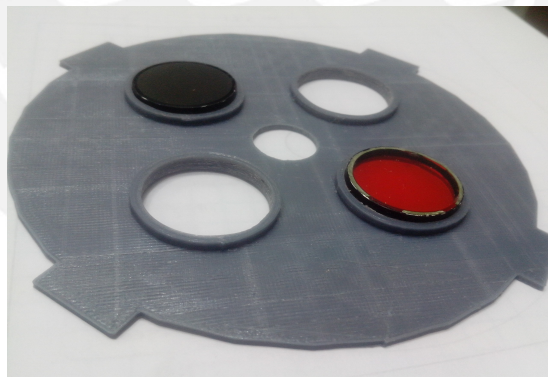


Figura 4.5. Disco con 2 filtros colocados.

Para realizar estas pruebas, se realizó un programa en C++, que está basado en los programas de prueba que brinda el fabricante de prueba. Estos programas son FlyCaptureTest y AsyncTriggerEx. El programa se ejecuta en el beaglebone, en el cual se encuentra conectada la cámara fireflymv en el puerto usb. Para este proyecto, se utilizó el modo 0 de trigger externo.

Se construyó un prototipo de una estructura que almacene todos los componentes de este proyecto.

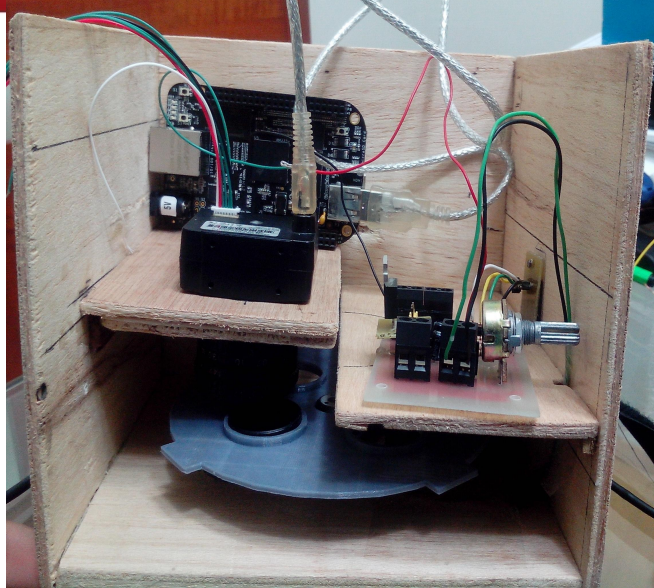


Figura 4.6. Chasis del proyecto.

Con la siguiente distribución se realizaron pruebas, las cuales consistieron en disparar la cámara externamente y capturar un total de 30 imágenes en formato png con los filtros rojo e infrarrojo cercano y se obtuvieron los siguientes resultados.

En primer lugar, se pudo monitorear el tiempo que le tarda al sistema en capturar una imagen. Tal como se puede observar en la imagen a continuación, la duración de la captura es un tiempo que se encuentra entre 130 y 200 ms.

Para asegurar que se capturen imágenes con todos los filtros, se hizo girar al filtro de tal manera que demore de pasar entre filtro y filtro un tiempo de 200 ms.

Además, se obtuvo como resultado las siguientes imágenes.



Figura 4.7. Imagen tomada sin filtro.



Figura 4.8. Imagen tomada con filtro rojo



Figura 4.9. Imagen tomada con filtro infrarrojo.

Como se puede observar, en la imagen que se capturó con el filtro rojo, la vegetación que a crecido correctamente absorbe el rojo y en la imagen se ve más oscuro. Por el contrario, en la imagen que se capturó con el filtro infrarrojo, se observa que la vegetación saludable refleja la longitud de onda infrarroja por lo cual se ve clara en la imagen.

Por último, se realizó una prueba similar, con la diferencia que la cámara estuvo estática para capturar exactamente la misma imagen en dos bandas distintas.

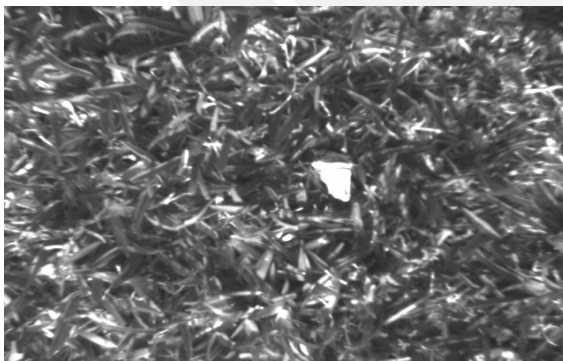


Figura 4.10. Prueba estática con filtro rojo.

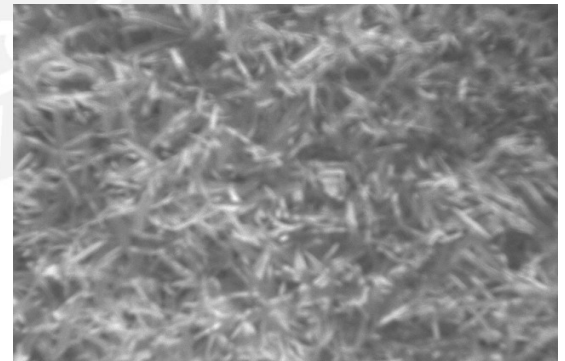


Figura 4.11. Prueba estática con filtro infrarrojo.

En esta prueba, se obtuvo como resultado 2 imágenes que capturaron exactamente la misma escena, con lo cual sería sencillo realizar análisis con estas imágenes. Cada una de las imágenes tiene un tamaño de 300kB, por lo



que en la memoria interna de la cámara se podría almacenar una cantidad de 1000 imágenes sin ningun problema.

#### 4.4. Análisis de requerimiento de corriente.

El diseño de esta cámara multispectral se utilizará en una nave aérea no tripulada, por lo cual el consumo de corriente es muy importante para determinar de que manera sera energizado el sistema. A continuación se muestra los consumos de corriente de los elementos del sistema.

Tabla 4.1. Tabla de consumo de corriente.[22][25]

	Corriente	Voltaje
Beaglebone	500 mA	5 V
Hardware electrónico	60 mA	5 V
Cámara	(Se energiza del beaglebone)	5 V
TOTAL	560 mA	5 V

Como el diseño se encontrará volando en un vehículo aéreo no tripulado, estos poseen baterías como las que se muestran en la figura 4.12.



Figura 4.12. Batería de un vehículo aéreo no tripulado.[35]

Esta batería es de 1000mAH y tiene un voltaje de 11.1v[35]. Como el voltaje que necesita el sistema es de 5v, se utilizaría un regulador de tipo switching que venden llamado APM Power Module el cual brinda un voltaje de 5.3v y una corriente máxima de 2.25 A lo cual podría energizar todo el sistema.



Figura 4.13. APM Power Module.[36]

#### 4.5. Costos del diseño.

Se evaluará el costo del diseño de la cámara multiespectral.

Tabla 4.2. Tabla del costo del diseño de la cámara multiespectral.[25][22][29]

Componente	Precio
Beaglebone	S/.290
Cámara FireflyMV	S/.825
Filtro Rojo	S/.450
Filtro Infrarrojo	S/.450
Hardware Electrónico	S/.15
Chasis	S/.50
<b>Total</b>	<b>S/.2080</b>

El costo de los componentes para realizar la cámara multiespectral es de 2080 nuevos soles. En la fecha de desarrollo del proyecto, 1 dolar equivalía a 2,9 nuevos soles.

$$S/2080 = 717.24 \text{ USD}$$

Por lo tanto, el proyecto, en componentes, tuvo un coste de 717.24 USD , tomando en consideración que este diseño realizado es un prototipo.

A este precio, le falta añadir el precio de las horas-hombre. El diseño tuvo una duración aproximada de 4 meses, a un coste de S/.750 soles por mes.



$$4 \times 750 = S/.3000 = 1034.48 \text{ USD}$$

$$\text{total: } 717.24 + 1034.48 = 1751,72 \text{ USD}$$

El precio total del proyecto fue de 1751,72 USD.

Este costo que se presenta es referente al prototipo realizado, para una posterior producción en masa los costos y el tiempo serían menores y el precio al público se procedería a evaluar.



## CONCLUSIONES

1. Se desarrolló una cámara multispectral cuyo costo es menor al de una cámara multispectral comercial. Esta cámara de bajo costo cumplía con todos los requerimientos y objetivos que se buscaban.
2. Se desarrolló una cámara multispectral que presenta mejoras respecto a desarrollos anteriores realizados en la PUCP. En primer lugar, el desarrollo de este proyecto necesita la utilización de solo una cámara; mientras que, en desarrollos anteriores era necesaria una cámara por cada banda que se quiera capturar. Además, este desarrollo es flexible debido a que el número de bandas en las que se puede capturar depende del número de filtros que se coloque en la plataforma giratoria y no del número de cámaras.
3. El diseño de la cámara multispectral presenta un tiempo de adquisición de imágenes de 200 ms, tiempo que es menor al que ofrecen las cámaras del fabricante Tetracam, modelo ADC.[30]

## RECOMENDACIONES

1. Para que el hardware electrónico sea mas pequeño, realizar las tarjetas en doble capa.
2. Proteger el sistema cuando se monte en una aeronave para que no afecte su correcto funcionamiento. La protección debe ser principalmente contra las vibraciones.
3. Asegurarse de no volar muy rapido la aeronave no tripulada debido a que pueden existir áreas en las que no se capturen las imagenes.
4. Para lograr capturas de imagenes mas rapidas probar con plataformas mas potentes que el beaglebone.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bhagyalaxmi.S.Kulloli ,Vijai.S.Rajpurohit, Anil B. Gavade  
2013 An Algorithmic Approach for Multispectral Image Quality Assessment. Belgaum.
- [2] Garini, Y., Young, I. T. and McNamara, G.  
2006 Spectral imaging: Principles and applications. Cytometry, 69A: 735–747.
- [3] Andrés Flores, Gonzalo Cucho, Ernesto Gordillo, Marlon Aucallanchi, Renán Rojas, Jorge Barba, Aurelio Rodríguez, Roberto Quiroz, Adolfo Posadas, Carolina Barreda, Hildo Loayza.  
2010 Low-cost airborne platforms and remote sensors for precision farming.
- [4] AGRONET. “La Agricultura de Precisión una oportunidad para la competitividad y la sostenibilidad de los sistemas productivos”, 2010 [visitada el 05/05/2014]  
[http://www.agronet.gov.co/www/docs\\_agronet/2006419142629\\_Agriculturadepresici%C3%B3n.pdf](http://www.agronet.gov.co/www/docs_agronet/2006419142629_Agriculturadepresici%C3%B3n.pdf)
- [5] Pixelteq. “SpectroCam | VIS-NIR” [visitada el 02/05/2014]  
<http://www.pixelteq.com/product/spectral-cameras/>
- [6] Pixelteq. “SpectroCam | VIS-NIR” [visitada el 02/05/2014]  
<http://www.pixelteq.com/product/pixelcam/>
- [7] Molecular Expressions. “Basic Aspects of Light Filters” [visitada el 03/05/2014]  
<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/lightandcolor/filtersintro.html>
- [8] WordPress. “About Circular Variable Filters” [visitada el 14/05/14]  
<http://variablefilter.wordpress.com/2012/05/07/hello-world/>

- [9] Newport. “Universal Rotator” [visitada el 01/06/14]  
<https://www.newport.com/NewStep-NSR-Series-Universal-rotator/427887/1033/info.aspx>
- [10] Digi Key. “Digi Key” [visitada el 21/05/14]  
<http://www.digikey.com/>
- [11] ICC. “Qué es NDVI” [visitada el 11/05/14]  
<http://www.icc.cat/esl/Home-ICC/Mapas-escolares-y-divulgacion/Preguntas-y-respuestas/Que-es-NDVI>
- [12] Princenton. USA. “Visible Spectrum” [visitada el 02/06/14]  
[https://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Visible\\_spectrum.html](https://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Visible_spectrum.html)
- [13] Adiveter. “Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIR) - La técnica de análisis rápidos del futuro” [visitada el 12/05/14]  
<http://www.adiveter.com/ftp/articles/Espectroscopia%20de%20Infrarrojo%20Cercano.pdf>
- [14] Itspa. “Motores de Corriente continua (DC)” [visitada el 23/06/14]  
<http://virtual.itspa.edu.mx/Robotica/archivos/dc-motor.pdf>
- [15] UDLAP. “Motores a paso” [visitada el 26/06/14]  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lep/hernandez\\_b\\_ii/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_b_ii/capitulo3.pdf)
- [16] DirectIndustry. “Filtro óptico de interferencia”. [visitada el 23/06/14]  
<<http://www.directindustry.es/prod/optosigma-corporation/filtros-opticos-interferencia-55412-590501.html>>
- [17] Optical Filter Shop. “Optical Filter Shop” [visitada el 28/06/14]  
<http://opticalfiltershop.com/>
- [18] RaspberryPi. “Raspberry Pi” [visitada el 01/07/14]  
<http://www.raspberrypi.org/>
- [19] Todohtpc. “Raspberry Pi” [visitada el 01/07/14]  
<http://www.todohtpc.com/analisis/cajas-y-equipos-htpc/raspberry-pi.html>

- [20] Intel. USA. "Intel Desktop Board D945FCLF" [visitada el 02/07/14]  
<http://ark.intel.com/es/products/42490/Intel-Desktop-Board-D945GCLF>
- [21] Amazon. USA. "Intel D945FCLF" [visitada el 04/07/14]  
<http://www.amazon.com/Intel-D945GCLF-Essential-Integrated-Processor/dp/B0018RWCKA>
- [22] Point Grey. "USB 2.0" [visitada el 05/07/14]  
<http://www.ptgreystore.com/>
- [23] SMC. "Monitoreo de cultivos", 2010 [visitada el 12/04/14]  
<http://www.monitoreodecultivos.com/>
- [24] Agricultura de Precisión. "Percepción Remota" [visitada el 12/04/14]  
<http://www.agriculturadeprecision.org/descargaltem.asp?item=/articulos/percepcion-remota/Percepcion-Remota.pdf>
- [25] SparkFun. USA. "SparkFun" [visitada el 13/10/2014]  
<http://www.sparkfun.com>
- [26] ArchLinux. "Raspberry Pi"[visitada el 10/09/14]  
<http://archlinuxarm.org/platforms/armv6/raspberry-pi>
- [27] CorrederaJorge. "Wifi Under Raspberry"[visitada el 11/09/14]  
<http://www.correderajorge.es/wifi-under-raspberry-pi-with-archlinux/>
- [28] Beagleboard. "Demo: Blink an external LED" [visitada el 10/08/14]  
<http://www.beaglebord.org>
- [29] Andcorp. "Andover Corporation" [visitada el 09/08/14 ]  
<http://www.andcorp.com/>
- [30] Tetracam. "Tetracam" [visitada el 09/08/14 ]  
<http://www.tetracam.com>
- [31] CIP. "Centro Internacional de la Papa" [visitada el 04/05/2014]  
[cipotato.org/](http://cipotato.org/)



- [32] Agricultura de precisión. “Agricultura de precisión” [visitada el 13/05/2014]  
<http://agriculturadeprecision.co/agricultura-de-precision/>
- [33] ABC. “La tecnología punta de la agricultura”[visitada el 12/05/2014]  
<http://www.abc.es/natural-biodiversidad/20130412/abci-agricultura-tecnologia-punta-201304121101.html>
- [34] MINAG. “Ministerio de Agricultura y Riego”. [visitada el 15/05/2014]  
<http://www.minag.gob.pe/portal/sector-agrario/agricola/cultivos-de-importancia-nacional/papa>
- [35] Ladronesshop. “Ladronesshop”[visitada el 15/10/2014]  
<http://www.ladronesshop.com>
- [36] 3drobotics. “APM Power Module”. [visitada el 25/10/2014]  
<https://store.3drobotics.com/products/apm-power-module-with-xt60-connectors>