



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

**TEMA: “DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
ELECTRÓNICO PARA FOTOGRAMETRÍA EN UN DRON DE ALA FIJA
OPTIMIZANDO EL CONSUMO DE ENERGÍA.”**

AUTOR: MORA CONSTANTE, CARLOS ANDRÉS

DIRECTOR: ING. AYALA TACO, JAIME PAÚL, PhD

SANGOLQUÍ

2019



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y
CONTROL**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA FOTOGRAMETRÍA EN UN DRON DE ALA FIJA OPTIMIZANDO EL CONSUMO DE ENERGÍA*” fue realizado por el señor *Mora Constante, Carlos Andrés* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 17 de abril de 2019

Firma:

Ing. Jaime Paúl Ayala Taco, PhD

C. C.: 1709434243



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Mora Constante, Carlos Andrés*, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA FOTOGRAMETRÍA EN UN DRON DE ALA FIJA OPTIMIZANDO EL CONSUMO DE ENERGÍA”*** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 17 de abril de 2019

Firma

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'Carlos Mora Constante', is positioned above the printed name.

Carlos Andrés Mora Constante

C.C.: 1721946190



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

AUTORIZACIÓN

*Yo, **Mora Constante, Carlos Andrés** autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO PARA FOTOGRAMETRÍA EN UN DRON DE ALA FIJA OPTIMIZANDO EL CONSUMO DE ENERGÍA**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.*

Sangolquí, 17 de abril de 2019

Firma

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Carlos Mora', written over a horizontal line.

Carlos Andrés Mora Constante

C.C.: 1721946190

DEDICATORIA

A Dios.

Por darme salud y llenarme de bendiciones.

A mis padres Martha y Carlos.

Por todo el esfuerzo, dedicación, enseñanzas y valores que me han inculcado para ser una persona de bien.

A mis hermanas Gabriela y Mayra.

Por aconsejarme y ayudarme en cada etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTO

A Dios por bendecirme con una hermosa familia y por darme la fuerza para cumplir mis objetivos.

A mis padres que me han ayudado en todo a lo largo de mi vida, les agradezco infinitamente por el mejor obsequio que me han entregado: la educación.

A mis hermanas muchas gracias por todo el apoyo, nunca cambiaría nada de lo vivido a su lado. Soy muy afortunado de tener a ustedes en mi vida.

Gracias a mis amigos por compartir varios momentos inolvidables y estar siempre presentes en los buenos y malos momentos.

Al Ing. Paúl Ayala por compartir sus conocimientos y aclarar todas las preguntas que tuve a lo largo del proyecto, le deseo lo mejor a lo largo de su vida personal y profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	1
Justificación e Importancia.....	5
Objetivos	8
Objetivo General	8
Objetivos Específicos.....	8
Descripción del Proyecto.....	8
CAPÍTULO I ESTADO DEL ARTE.....	11
1.1. Vehículo aéreo no tripulado (UAV)	11
1.1.1. Partes de un dron.....	13
1.2. Aplicación de drones para fotogrametría.....	15
1.2.1. Parámetros para fotogrametría	17
1.3. Opciones del sensor de imagen y controlador	20
1.3.1. Sensor de imagen CMOS IMX219PQ y controlador Raspberry Pi Zero W.....	21
1.3.2. Sensor de imagen CMOS OV7670 y controlador Teensy 3.6	24
1.4. Controlador y sensor de imagen elegidos.....	26
1.5. Baterías	29
1.6. Modelos de baterías	30
1.6.1. Modelo ideal.....	30
1.6.2. Modelo comportamental	31

1.6.3. Modelo del circuito equivalente	31
1.7. Estado de carga (SOC).....	33
1.7.1. Medición o evaluación directa	34
1.7.2. Sistema adaptativo.....	35
1.7.3. Estimación tradicional.....	35
1.8. Sensor para la medición de corriente.....	36
CAPÍTULO II DESARROLLO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO PARA FOTOGRAMETRÍA.....	40
2.1. Especificaciones requeridas.....	40
2.2. Configuración previa	41
2.3. Programación en lenguaje Python	45
2.4. Configuración adicional para ejecución del algoritmo.....	48
2.5. Diseño de la placa electrónica	50
2.6. Acondicionamiento y ensamblaje del sistema.....	51
2.7. Pruebas de resolución de fotogramas y video	52
2.8. Pruebas de funcionamiento.....	56
CAPÍTULO III MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL DRON	62
3.1. Requerimientos.....	62
3.2. Delimitación de reglas para la estrategia de control.....	64
3.3. Desarrollo del algoritmo de control para el estado de carga.	66
3.4. Pruebas ejecutadas y resultados obtenidos.	68
CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
4.1. Conclusiones	75
4.2. Recomendaciones.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXOS.....	82
Apéndice A.....	82
Anexo A1. Algoritmo para el sistema de fotogrametría	82
Anexo A2. Elaboración y conexión de PCB.....	83
Anexo A3. Algoritmo para el control basado en reglas	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. UAV EVENT modelo E386	13
Figura 2. Relación entre altitud y área de imagen capturada	17
Figura 3. Relación entre altitud y velocidad de obturación.....	18
Figura 4. Características principales para determinar el GSD	19
Figura 5. Sensor de imagen CMOS Sony IMX219PQ	22
Figura 6. Tarjeta Raspberry Pi Zero W	24
Figura 7. Sensor de imagen CMOS OV7670 por Omnivision.....	25
Figura 8. Tarjeta Teensy 3.6	26
Figura 9. Diagrama de funcionamiento del procesamiento de imagen o video	27
Figura 10. Modelo de batería simple.....	32
Figura 11. Modelo de batería Thevenin	33
Figura 12. Relación entre la sensibilidad del sensor versus la temperatura del ambiente	37
Figura 13. Error de la salida del sensor frente a la temperatura del ambiente	38
Figura 14. Voltaje de salida frente a la corriente detectada por el sensor.....	38
Figura 15. Estado del servicio DHCP	42
Figura 16. Creación del archivo para arranque de programa	43
Figura 17. Asignación de dirección IP estática.....	44
Figura 18. Habilitación del módulo de cámara de Raspberry Pi Zero W	45
Figura 19. Diagrama de flujo del algoritmo a implementar para el sistema de fotogrametría.....	47
Figura 20. Programa para arrancar un script al iniciar Raspberry	49
Figura 21. Esquema del circuito electrónico.....	50
Figura 22. Vista frontal y posterior del diseño de la carcasa para el sistema de fotogrametría	52
Figura 23. Imagen capturada con resolución de 1366 x 768 píxeles	53
Figura 24. Imagen capturada con resolución de 1280 x 720 píxeles	54
Figura 25. Imagen capturada con resolución de 1920 x 1080 píxeles	55
Figura 26. Sistema con la trayectoria de vuelo del dron de ala fija	56
Figura 27. Ejemplo 1 de la captura aérea de la zona de pruebas.....	60
Figura 28. Captura de Google Maps área de 7018.63 m ²	60
Figura 29. Ejemplo 2 de la captura aérea de la zona de pruebas.....	61

Figura 30. Captura de Google Maps área de 7020.86 m ²	61
Figura 31. Diagrama de flujo del algoritmo a implementar para el control de acuerdo al estado de carga de la batería.....	65
Figura 32. Prueba efectuada trabajando con todas las cargas conectadas.....	69
Figura 33. Funcionamiento de la regla de control 1.....	70
Figura 34. Funcionamiento de la regla de control 2.....	71
Figura 35. Funcionamiento de la regla de control 3.....	72
Figura 36. Comparación del consumo de intensidad después de aplicar la estrategia de control.....	74
Figura 37. Esquema del circuito electrónico	83
Figura 38. Diseño y medidas de PCB.....	84
Figura 39. Placa electrónica elaborada	84
Figura 40. Simulación de conexión entre la placa y la tarjeta electrónica.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Condiciones Ambientales</i>	4
Tabla 2 <i>Características principales dron EVENT E386</i>	12
Tabla 3 <i>Características de tarjeta electrónica Raspberry Pi Zero W</i>	22
Tabla 4 <i>Características de tarjeta electrónica Teensy 3.6</i>	25
Tabla 5 <i>Características del rendimiento del sensor de corriente ACS712 30 A</i>	36
Tabla 6 <i>Características del sensor de imagen empleado y del vuelo del dron</i>	57
Tabla 7 <i>Superposición esperada en cada frame de acuerdo al ancho o alto</i>	59
Tabla 8 <i>Consumo de corriente y tiempo de duración de cada módulo por separado</i>	68
Tabla 9 <i>Valores procedentes de las pruebas de consumo de corriente</i>	73
Tabla 10 <i>Comparación del consumo de intensidad antes y después de aplicar la estrategia de control</i>	73

RESUMEN

El presente trabajo de titulación es parte de un proyecto macro dentro de un grupo de investigación de Red CEDIA, conformado por Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Escuela Politécnica Nacional y Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca. El objetivo final del proyecto, consiste en emplear un dron de ala fija para monitorear la red hídrica en ciertas regiones de la Reserva Ecológica Antisana, para lo cual, en este trabajo de titulación, se ha desarrollado un sistema electrónico, capaz de realizar fotogrametría junto con un control de consumo energético para aumentar la autonomía, los mismos que serán implementados en un dron de ala fija. El sistema de fotogrametría capta los frames, los cuales, permiten determinar la concentración de agua en la región. Este sistema considera varios parámetros como: control de obturación, resolución, velocidad de vuelo, nivel de brillo, sensibilidad ISO, contraste, velocidad de obturación, distancia de muestreo en tierra y espacio de almacenamiento. Para aumentar la autonomía del dron se implementa un control basado en reglas de acuerdo al estado de carga de la batería, aplicando la estimación basada en la intensidad conocida como el medidor amperios-hora (A/h) de Coulomb, donde se subdividirá al dron en diversos módulos para medir el consumo de energía de cada carga y de acuerdo al porcentaje del SOC, dichos módulos se desactivarán cumpliendo las reglas de control implementadas.

Palabras claves:

- **DRON DE ALA FIJA**
- **FOTOGRAMETRÍA**
- **EFICIENCIA ENERGÉTICA**
- **ESTADO DE CARGA (SOC)**

ABSTRACT

The present titration work is part of a macro project within a research group of the Red CEDIA, made up of the University of the Armed Forces ESPE, the National Polytechnic School and the Salesiana Polytechnic University of Cuenca. The final goal of the project is to use a fixed wing drone to monitor the water network in certain regions of the Antisana Ecological Reserve, for which, in this titration work, an electronic system has been developed, capable of performing photogrammetry together with a control of energy consumption to increase autonomy, which will be implemented in a fixed wing drone. The photogrammetry system captures the frames, which allow to determine the concentration of water in the region. This system considers several parameters such as: shutter control, resolution, flight speed, brightness level, ISO sensitivity, contrast, shutter speed, ground sampling distance and storage space. To increase the autonomy of the drone a rule-based control is implemented according to the state of charge of the battery, applying the estimate based on the intensity known as the amp-hour meter (A/h) of Coulomb, where the drone will be subdivided into several modules to measure the energy consumption of each load and according to the percentage of the SOC, said modules will be deactivated in compliance with the control rules implemented.

Keywords:

- **FIXED WING DRON**
- **POTOGRAMMETRY**
- **ENERGY EFFICIENCY**
- **STATE OF CHARGE (SOC)**

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Dron o vehículo aéreo no tripulado (UAV por sus siglas en inglés *Unmanned Aerial Vehicle*), es una aeronave que vuela gracias a un conjunto de sensores, actuadores y controladores electrónicos que reemplazan a la tripulación de una aeronave. Actualmente, la apertura de esta tecnología a personas civiles ha llevado a que el uso de drones se pueda aplicar en varios campos como en seguridad y defensa, búsqueda y rescate, agricultura, mapeados 3D, arquitectura, investigación, fotografía y video, monitorización, entre otros (Addati & Pérez Lance, 2014).

El control de un dron se lo realiza a distancia por una persona encargada de dirigirlo o a su vez puede ser controlado mediante software gracias a algoritmos que contengan la trayectoria específica que el dron va a recorrer. Todo el equipo para operar un dron se lo conoce como sistema de aviones no tripulados (UAS por sus siglas en inglés *Unmanned Aircraft System*), este equipo está conformado por la estación de control, la unidad remota de transmisión de datos y el dron. Para llevar a cabo el vuelo se deben tomar en cuenta varios factores como la distancia a recorrer, la altura de vuelo, el peso del dron, el tipo de dron; ya sea de ala fija o rotante, los sensores a utilizar, la operación del dron; si será manual o autónoma, duración del tiempo de vuelo y las leyes físicas existentes en el lugar donde se planea hacer el vuelo (Addati & Pérez Lance, 2014).

Básicamente existen dos tipos de drones, los de ala fija y los de ala rotativa, para seleccionar el tipo de dron que se va a emplear se debe tomar en cuenta el objetivo que deberá cumplir el dron. Cuando se requiera ejecutar vuelos a mayor velocidad y altura, la mejor opción sería utilizar un dron de ala fija, mientras que si se desea realizar movimientos estacionarios o maniobras a menor velocidad se utilizaría un dron de ala rotativa (Fernández Lozano & Gutiérrez Alonso, 2016).

Para realizar una misión de fotogrametría con el dron es preciso ejecutar un procedimiento, empezando por una inspección física del espacio a volar. Esto para tomar en cuenta las condiciones ambientales que influirán en el desempeño del mismo, estas condiciones son: altura, temperatura del aire, humedad del aire, velocidad del viento, radiación solar, nubosidad y lluvia. Además, hay que fijar los tiempos precisos para la ejecución de la misión, al considerar el área que se va a sobrevolar, una vez tomado en cuenta todos los parámetros necesarios se ejecuta el vuelo ya sea de manera autónoma o manual (García Fernández, 2015).

Una de las partes fundamentales de un dron es la batería, ya que sin esta no se podría activar ningún circuito electrónico. Es esencial que la batería almacene la mayor cantidad de energía posible para que pueda brindar mayor autonomía al dron, esto actualmente es un problema debido a que, si se desea aumentar la energía de una batería, el tamaño también incrementará lo cual dificulta el vuelo. En la actualidad el tipo de batería que más se utiliza en drones es la de polímero de litio (Li-Po) seguidas por las baterías de ion de litio (Li-Ion). Para seleccionar la batería se debe tener en cuenta el consumo energético de los sensores, actuadores y controladores que se van a usar en el dron. En los sistemas que utilicen este tipo de baterías es esencial tener una estimación del estado de la carga (SOC por sus siglas en inglés *State of charge*) (Saldaña Aguirre, Hernández Castañeda, Báez, Morales, & Leal López, 2016).

Dado que en la actualidad el desarrollo de sistemas electrónicos portables ha tenido un crecimiento superior con el avance de la tecnología, se busca que los componentes disminuyan su tamaño y aumenten su eficiencia, donde uno de los mayores problemas es la cantidad de energía para su funcionamiento. Hoy en día se busca optimizar el consumo de energía para aumentar la autonomía del dron, esto se hace al emplear circuitos electrónicos con sensores y actuadores más

pequeños, pero con igual fiabilidad que otros de mayor volumen, a su vez también se ha mejorado la estructura del dron haciéndola de materiales más livianos y resistentes (Márquez Díaz, 2018).

A parte de la batería, otro componente esencial en un dron es la cámara con la cual se puede captar video en tiempo real, además de adquirir imágenes y videos para almacenarlos en una memoria y así proceder a realizar un procesamiento de imágenes para obtener los datos que se deseen. Para la incorporación de una cámara en el dron es necesario tomar en cuenta varios factores como es el peso, la resolución que se necesite de la imagen, la energía que se requiere para la alimentación y el acoplamiento al dron (Rodríguez González, 2017).

Para la fotogrametría es necesario calibrar la cámara, donde el problema más sobresaliente es la dificultad para evaluar la precisión de la técnica utilizada. En la calibración se toman en cuenta parámetros geométricos como son la distancia focal y coordenadas del punto principal. Además, hay que tener en cuenta los parámetros físicos de la distorsión radial y tangencial (Sánchez Martín, Arias Pérez, González Aguilera, & Gómez Lahoz, 2004).

El presente proyecto forma parte de una investigación auspiciada por CEDIA (Red Nacional de Investigación y Educación Ecuatoriana) que promueve la investigación para el beneficio del país con el Concurso Ecuatoriano de Proyectos en I+D+i (CEPRA) donde la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE junto a la Universidad Politécnica Nacional y Universidad Politécnica de Cuenca ganaron la convocatoria de proyectos edición XII, con el proyecto de estudio de la red hidrológica en la Reserva Ecológica Antisana aplicando drones para fotogrametría y realizar un procesamiento de imágenes con lo que se obtendrá datos acerca de la saturación hídrica en el suelo (CEPRA, 2018).

Actualmente en el proyecto se ha establecido la identificación del área de interés dentro de la Reserva Ecológica Antisana, donde se han realizado vuelos con distintos tipos de drones, para que, gracias a sensores instalados en los mismos, se puedan obtener datos de las condiciones ambientales a las que se debe enfrentar el dron que realizará la misión de fotogrametría. Todos los datos captados se han detallado en la Tabla 1.

Tabla 1
Condiciones Ambientales

Variable	Zona 1			Zona 2		Zona 3		Zona 4
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 1	Medida 2	Medida 1	Medida 2	Medida 1
<i>Altura [m]</i>	3787	3787	3786	3916-4100	3915	3943	3915	3820
<i>Presión [hPa]</i>	638	633,8	633,6	623,3	623,2	621	623,2	631,1
<i>Apto. Evaporación [°C]</i>	2,3	6,7	4,6	6	1,9	3,9	5,8	6,3
<i>Pto. Rocío [°C]</i>	-4,4	3,3	1,3	-0,5	-4,5	1	20	3
<i>Calor [°C]</i>	8,3	9,8	9,5	8,9	6,4	8,6	3	11,3
<i>Humedad [%]</i>	50	59,1	59,3	44	45,9	60	49	56,4
<i>Frío [°C]</i>	4,9	10	8,1	6,2	24	4,3	12,5	10
<i>T [°C]</i>	9,6	10,4	10	9,6	8	8,8	14	11
<i>Velocidad de Viento [m/s]</i>	6	9,6-10,6	10,2	10,4-11,0	10,4	8-12,3	4,0-8,0	9

Fuente: (Rodríguez & Méndez, 2018)

Con dichos datos se pasa a la etapa número dos del proyecto donde se adquiere el dron que se va a utilizar. Además, una vez adquirido el dron que cumpla con las especificaciones necesarias para la misión, los parámetros más importantes que se deben tomar en cuenta de la tabla 1 son la velocidad del viento y la temperatura. Esto debido a que al momento de implementar el circuito electrónico de la cámara y el control de la batería se deben buscar puntos de equilibrio para no

desbalancear el dron si se presenta una ráfaga de viento y para que el circuito de la batería no se sobrecaliente al exponerse a las condiciones ambientales.

En el presente trabajo de investigación se busca implementar un circuito electrónico comprendido por un sensor óptico, una tarjeta electrónica que controle a dicho sensor y que pueda almacenar los datos en una tarjeta de memoria SD. Con este circuito electrónico se pretende realizar fotogrametría aplicando un procedimiento y modelo para la calibración de la cámara, además se busca mejorar la eficiencia energética del dron para tener una autonomía mayor, utilizando una estrategia de control que permita administrar las cargas electrónicas en función del estado de carga del sistema electrónico del dron. Cabe recalcar que en la presente etapa del proyecto se pretende realizar todas las pruebas de funcionamiento en el campus de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en Sangolquí.

Justificación e Importancia

El proyecto ganador en la edición XII de CEDIA (Red Nacional de Investigación y Educación Ecuatoriana), pretende registrar datos referentes a la saturación hídrica del suelo en la región de la Reserva Ecológica Antisana, haciendo uso de drones. Este proyecto brinda varios beneficios para la flora y fauna del sitio donde se lo utilice, ya que una vez realizado los estudios se podrá dar un mejor cuidado a las áreas que necesiten una mayor captación de agua, teniendo en cuenta que el sitio donde se va a llevar a cabo el proyecto es un área protegida (CEPRA, 2018).

En dicho proyecto se va a ser uso de un dron de ala fija el cual tiene un costo aproximadamente de \$7000 USD, con un año de garantía siempre y cuando no se manipule sus componentes electrónicos internos, razón por lo cual es indispensable desarrollar un circuito electrónico de fotografía externo a la electrónica del dron, el cual no ocupe mucha energía y sea de menor tamaño

y peso, pero que a su vez capture videos e imágenes con la resolución requerida para realizar un procesamiento de imágenes de la red hidrológica de la Reserva Ecológica Antisana, sin problema alguno. La captura de las imágenes se realizará mediante un sensor óptico conectado a un circuito electrónico el cual almacenará todos los datos en una tarjeta de memoria SD. Una vez seleccionado el sensor óptico a utilizarse, se debe llevar a cabo un procedimiento y modelo para calibrarlo, teniendo en cuenta los parámetros físicos de la profundidad y la distorsión radial, así como los parámetros geométricos; siendo estos la distancia focal y coordenadas del punto principal. Además, hay que tomar en cuenta que las fotografías que se tomaran deben ser ortogonales. Se busca implementar todo el sistema de la cámara en lugar de comprar una cámara especial, esto para obtener beneficios como lo son menor peso, menor consumo de energía y menor costo.

Es de gran importancia que un dron posea un mayor tiempo de autonomía para cumplir su misión u objetivo, para esto se debe considerar que la capacidad de energía que posee la batería es limitada y hay que tener presente la cantidad de energía que demanda cada uno de los componentes del dron. Para que una batería tenga un tiempo de vida útil mayor hay que tener en cuenta los ciclos de carga y descarga. Además, se busca una batería del tipo Li-Ion que cumpla con los requisitos de la batería original del dron tipo Li-Po, dado que la batería tipo Li-Po además de ser más pesada es más inflamable a temperaturas altas (Saldaña Aguirre, Hernández Castañeda, Báez, Morales, & Leal López, 2016).

Es por esto que se aporta al proyecto con el desarrollo e implementación de un circuito electrónico para fotogrametría, el cual constará de una tarjeta electrónica que almacenará los datos obtenidos por el sensor óptico en una tarjeta de memoria SD. La cámara será calibrada basándose en los parámetros geométricos como son la distancia focal y coordenadas del punto principal, de

igual manera hay que tener en cuenta los parámetros físicos de la distorsión radial y tangencial. Además, se pretende mejorar la eficiencia energética a partir de la estimación del estado de la carga, con lo que se obtiene una autonomía mayor en el dron para que cumpla su misión sin problema alguno.

Alcance

Se pretende desarrollar e implementar un circuito electrónico constituido de hardware y software para realizar fotogrametría y aumentar la autonomía de un dron.

El presente proyecto cumplirá con las siguientes características:

- Implementar un circuito electrónico que controle un sensor óptico y almacene los datos en una tarjeta de memoria SD.
- Realizar pruebas de funcionamiento del circuito implementado para fotogrametría.
- Elaborar una estrategia de control basada en reglas para las cargas eléctricas presentes en el dron.
- Realizar pruebas de comparación de autonomía al sistema de almacenamiento de energía con la batería Li-Po y Li-Ion e implementar la mejor opción en el dron.

Con esto se busca cubrir las necesidades de la incorporación del circuito electrónico para llevar a cabo la fotogrametría, tomando en cuenta todas las condiciones ambientales de la Reserva Ecológica Antisana, además de aumentar la autonomía de vuelo del dron seleccionado dentro del proyecto de la RED CEDIA.

Objetivos

Objetivo General

- Desarrollar un sistema electrónico para fotogrametría optimizando el consumo de energía en un dron de ala fija.

Objetivos Específicos

- Implementar y calibrar un circuito electrónico con un sistema de almacenamiento para realizar fotogrametría.
- Realizar pruebas del estado de carga en la batería seleccionada.
- Implementar un control basado en reglas que interactúe de acuerdo al estado de carga de la batería.

Descripción del Proyecto

El presente proyecto desarrolla un circuito electrónico, que permite realizar fotogrametría basándose en parámetros como: las características de vuelo del dron, condiciones ambientales, entre otros. Se realiza dicha técnica de captura de *frames* para formar un mapeado digital de una zona específica. Además, se realizará el análisis del consumo energético de las partes del dron comparando una batería tipo Li-Po frente a una batería tipo Li-Ion, para así escoger la batería más eficiente y elaborar una técnica de control basada en reglas, la cual permita aumentar la autonomía de vuelo del dron.

Para realizar dicho proyecto se lleva a cabo un conjunto de actividades las cuales son detalladas en cada capítulo a continuación.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

Investigación acerca de los componentes electrónicos de los vehículos aéreos no tripulados (UAV por sus siglas en inglés *Unmanned Aerial Vehicle*) y tipos de sensores y controladores que se pueden utilizar para fotogrametría. Además, se realiza una investigación acerca del comportamiento de las baterías y se selecciona la opción que preste una eficiencia energética mayor para el dron basándose en los métodos que existen para la estimación de estado de carga en el sistema.

CAPÍTULO II

DESARROLLO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO PARA FOTOGRAMETRÍA

Presenta el diseño e implementación de un circuito electrónico que permite controlar un sensor óptico CMOS Sony IMX219PQ. En el algoritmo de control se manipulan varios parámetros necesarios para llevar a cabo la fotogrametría, entre estos se tiene: velocidad de vuelo, detección de iluminación, balance de blancos, sensibilidad ISO, control de obturación y espacio de almacenamiento. Una vez desarrollado el sistema de fotogrametría se realizan pruebas de funcionamiento y se comentan los resultados obtenidos.

CAPÍTULO III

MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL DRON

Se divide al dron en módulos y se determina la cantidad de energía que consume cada uno, de esta manera se realiza la estimación del estado de carga del sistema de almacenamiento energético.

A partir de la estimación basada en la intensidad, conocida como el medidor amperios-hora (A/h) de Coulomb se desarrolla un control basado en reglas, el cual permite incrementar la autonomía del dron. Con el control implementado se procede a realizar pruebas de funcionamiento, con lo cual se argumentan los resultados obtenidos.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el capítulo final se expondrán las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el transcurso del desarrollo del proyecto de investigación.

CAPÍTULO I ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se va a investigar sobre los vehículos aéreos no tripulados (UAV), haciendo un desglose de sus componentes. Además, se detallarán las opciones de sensores y controladores que se consideraron para implementar un sistema electrónico que capture *frames*, con el cual se realizará fotogrametría. Al continuar con la investigación, se detallan los modelos de baterías y las prestaciones que ofrecen, siguiendo con la definición y métodos para determinar el estado de carga de una batería. Con esto se busca optimizar el consumo de energía mediante un control basado en reglas de acuerdo al porcentaje del estado de carga de la batería.

1.1. Vehículo aéreo no tripulado (UAV)

Un UAV o dron es una aeronave no tripulada que dispone de controladores, sensores y actuadores para realizar un vuelo sin tripulación. Al escoger un dron para una tarea específica se debe tomar en cuenta factores como son el peso, resistencia, alcance, tiempo de vuelo y tamaño. UVS Internacional ha definido 3 categorías principales de UAV (Remondino, Barazzetti, Nex, Scaioni, & Sarazzi, 2011):

- UAVs tácticos, con un rango medio y bajo de altitud, que pueden pesar desde pocos gramos hasta 30 kilogramos, con una autonomía de vuelo desde unos minutos hasta 2 o 3 días.
- UAVs estratégicos, con una robustez mayor, un rango alto de altitud (más de 20000 m.) y con una autonomía de 2 a 4 días.
- UAVs utilizados para tareas especiales como señuelos, espionaje o como sistemas letales.

Los UAVs tácticos son los drones más utilizados en la actualidad, teniendo varias aplicaciones como es, reconocimiento, vigilancia, mapeo e inspección de áreas determinadas. Sus prestaciones,

costo bajo y la alta cantidad de fabricantes hacen que esta categoría de drones sean los más utilizados por el público en general.

Para el proyecto se ha adquirido el dron de ala fija marca EVENT modelo E386, el cual presenta las características necesarias para el trabajo que se va a llevar a cabo. A continuación, en la Tabla 2 se pueden observar las principales características del dron y en la Figura 1 se aprecia el UAV.

Tabla 2
Características principales dron EVENT E386

Tipo	Ítem	EVENT E386
Hardware	Tipo	Ala fija
	Peso [kg]	2,5
	Envergadura [m]	1,9
	Dimensiones [cm]	190x130
	Material	Espuma de poliolefina expandida de alto rendimiento (EPO) Revestimiento de ABS
	Propulsión	Motor trifásico (brushless)
	Potencia del motor [W]	NA
	Tipo de batería	Li-Po
	Tensión de la batería [V]	NA
	Capacidad de la batería [mAh]	8000
Operación	Autonomía [min]	85
	Alcance [km]	58
	Velocidad de crucero [km/h]	46,8
	Techo de vuelo máximo [m]	3960
	Velocidad de viento [km/h]	43,2
	Payload [gr]	500
Comunicación	Distancia de control [km]	5
	Controlador de vuelo	Pixhawk 2.1
	Sistema de procesamiento	PPK

Adicionales	Tipo de despegue	Manual
	Angulo de despegue	NA
	Tipo de aterrizaje	Paracaídas
	Angulo de aterrizaje	NA

Fuente: (EVENT 38, 2018)



Figura 1. UAV EVENT modelo E386
Fuente: (EVENT 38, 2018)

1.1.1. Partes de un dron

Existen varios elementos y configuraciones para ensamblar un dron, aunque los elementos indispensables con los que un dron debe contar son:

- **Chasis:** Es el cuerpo o estructura del dron que puede ser elaborada de diferentes materiales según la aplicación que se le vaya a dar. Los principales materiales que se utilizan en la elaboración del chasis son: madera, plástico, fibra de vidrio, aluminio, fibra de carbono y polipropileno expandido (Giner Bellot, 2018).

- Hélices: Son dispositivos mecánicos que al girar se encargan de que el dron pueda elevarse y desplazarse; fabricadas de fibra de carbono, plástico y nylon. Hay que considerar el tamaño, número y ángulo de las aspas, ya que dependiendo de esto el consumo de energía será mayor o menor (Giner Bellot, 2018).
- Batería: Es la fuente que proporciona energía al dron, hay varios tipos de baterías como Li-Po, Li-Ion, NiMh o NiCd. Siendo la batería más utilizada la Li-Po (Polímero de iones de Litio), dado que puede almacenar mayor energía ocupando menos espacio (Giner Bellot, 2018).
- Motor: Es la parte encargada de transformar la energía eléctrica en energía mecánica para poder efectuar el vuelo del dron. Los motores pueden ser con escobillas(bifásicos) o sin escobillas; actualmente la mayoría de drones utilizan motores sin escobillas o *brushless*(trifásicos) ya que son más eficientes. Esto gracias a que, al no tener escobillas se tiene un mínimo rozamiento y el calor se disipa de mejor manera. Las desventajas de utilizar un motor sin escobillas son: una demanda de control de mayor complejidad y el precio es mayor (Giner Bellot, 2018).
- Variador: Es un controlador electrónico de velocidad, con el cual se controla la velocidad de giro del motor trifásico. Principalmente en el variador se debe tomar en cuenta el valor de amperaje que soporta, el cual como mínimo debe ser el valor del consumo máximo de potencia de los motores (Giner Bellot, 2018).
- Sensores: Son dispositivos capaces de captar magnitudes físicas, conocidas como variables de instrumentación y transformarlas en variables eléctricas. Estas variables eléctricas

envían toda la información que se desee al controlador del dron como, altitud, latitud, localización, presión, velocidad, entre otras (Giner Bellot, 2018).

- Controlador: Es el cerebro del dron, donde se recibe toda la información adquirida por los sensores y envía respuestas hacia los actuadores, como pueden ser los motores. Está compuesto por hardware y software, donde se puede emplear diversas estrategias de control (Giner Bellot, 2018).

1.2. Aplicación de drones para fotogrametría

La fotogrametría es una técnica que tiene como objetivo estudiar y dar a conocer la dimensión y posición de un objeto en el espacio, a partir de la unión de dos o más fotografías. Según la distancia de enfoque, la fotogrametría puede clasificarse en tres tipos: satélite, aérea y terrestre. Siendo la fotogrametría satélite aplicada en cartografía, mientras que los otros dos tipos son utilizados en arquitectura, ingeniería y arqueología. Además, la fotogrametría también puede ser clasificada dependiendo del medio que se emplee, de esta manera se puede tener la fotogrametría analógica, la cual se basa en la orientación exterior e interior manual de un restituidor óptico mecánico para obtener los datos. La fotogrametría analítica, igualmente basada en la recopilación de dimensiones y datos de manera manual, con la diferencia que emplea medios informáticos para realizar el cálculo de la orientación del modelo final. Por último, se tiene la fotogrametría digital donde se simplifica la manera de obtener los datos y dimensiones haciendo uso de sensores ópticos para captar imágenes los cuales pueden ser procesados de una mejor manera (Ruiz Sabina, Gallego Valle, Peña Ruiz, Molero García, & Gómez Laguna, 2015).

El desarrollo de sistemas electrónicos para fotografía empleando sensores y controladores, resultan ser una buena opción para disminuir costos y aumentar la eficiencia al momento de

capturar y realizar el procesamiento de imágenes. En el proyecto "Aplicación para la toma de datos de contexto para un UAV basado en Raspberry y ArduPilot " de (Ramos Gálvez, 2017) se emplea una tarjeta electrónica Raspberry Pi modelo 3 y un sensor de imagen Raspberry versión 2 con los cuales se realiza la adquisición de imágenes que se guardan en la memoria micro SD. Además, cuenta con un protocolo de comunicación para enviar video en tiempo real a un computador, en dicho proyecto se evidencia que el sistema para fotografía se integra a un dron tipo cuadricóptero donde las pruebas realizadas arrojan resultados positivos en cuanto a la resolución de las imágenes obtenidas (Ramos Gálvez, 2017).

Ramos Gálvez en su proyecto logra obtener imágenes de buena calidad, sin embargo, la transmisión de video en tiempo real cuenta con una limitación de alcance de hasta 25 metros, dado que pasado esta frontera de cobertura el sistema fallará y la tarjeta electrónica seguirá consumiendo energía al buscar e intentar conectarse a una red Wifi. Otro parámetro que no fue tomado en cuenta es el peso del controlador y sensores implementados en el dron que fue aproximadamente de 150 gramos lo cual afecta directamente a la autonomía del dron, una solución más práctica sería optar por elementos con un menor peso que se encuentran disponibles en el mercado tecnológico y cumplen las mismas funciones e incluso a un menor precio.

En el proyecto se va hacer uso de un dron para realizar fotogrametría digital aérea, con lo cual se espera obtener imágenes de gran calidad, esto gracias al sensor óptico utilizado para captar las imágenes y el software manipulado en el computador para procesar las imágenes obtenidas. El sensor de imagen es uno de los componentes más importantes para realizar la fotogrametría, se debe considerar las características técnicas del sensor a utilizar, así como también se debe tomar en cuenta las condiciones ambientales en donde se va a realizar el vuelo del dron.

1.2.1. Parámetros para fotogrametría

Entre los parámetros más importantes para realizar fotogrametría se tiene: velocidad de obturación, altitud y velocidad de vuelo, distancia focal, superposición y la distancia de muestreo en tierra (GSD, sus siglas del inglés *Ground Sampling Distance*). Dichos parámetros permiten determinar el tamaño del área que se captura en un frame. Los sensores ópticos pueden presentar la característica de tener una distancia focal fija o variable y de acuerdo a la altitud a la que se encuentre el dron el tamaño del frame disminuirá o aumentará proporcionalmente, es decir a mayor altura el frame capturará una mayor área de terreno y la resolución disminuirá (Pix4D, 2019).

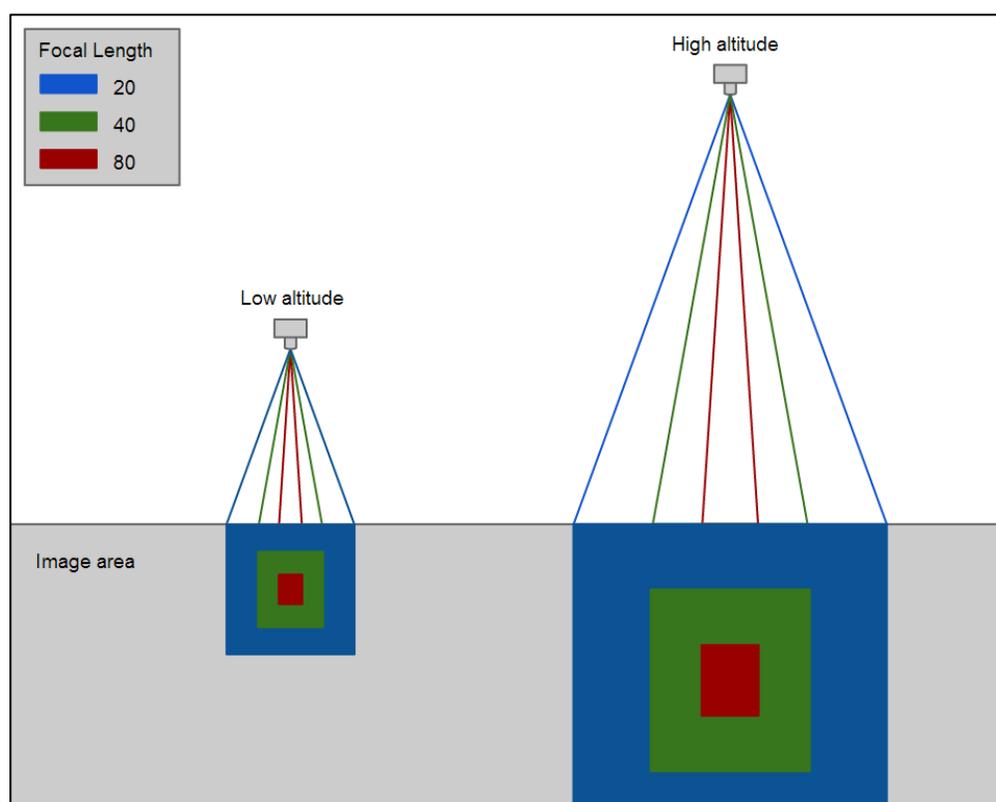


Figura 2. Relación entre altitud y área de imagen capturada
Fuente: (Pix4D, 2019)

De igual manera se puede relacionar altitud, velocidad de obturación, superposición y distancia focal. Al poner una velocidad de vuelo y distancia focal constantes y variar la velocidad del obturador y la altitud se puede tener (Pix4D, 2019):

- Con altitud baja y velocidad de obturación baja las imágenes se superpondrán en un porcentaje menor.
- Con altitud baja y velocidad de obturación alta el porcentaje de superposición aumentará.

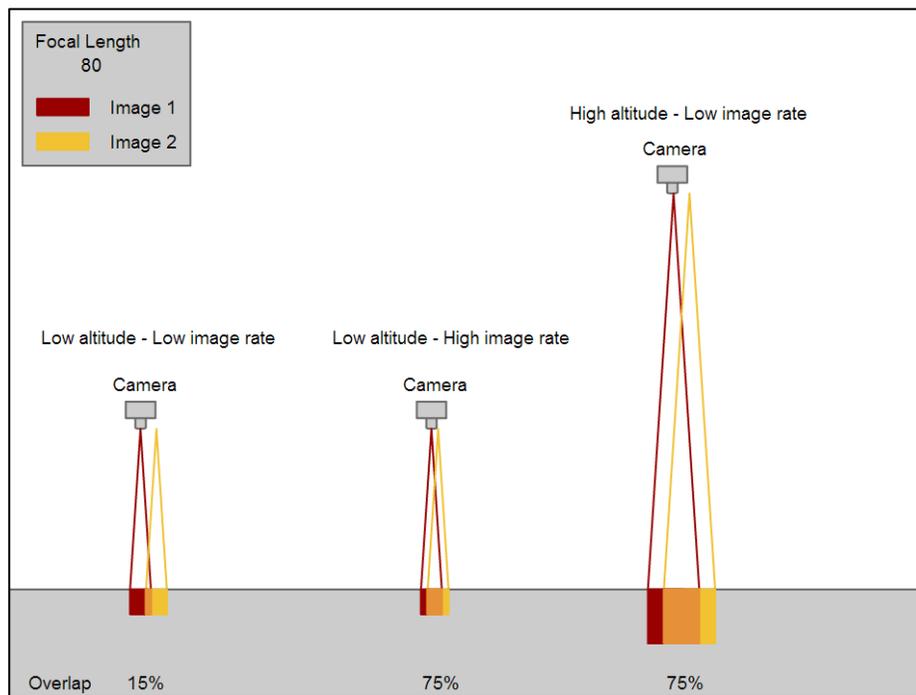


Figura 3. Relación entre altitud y velocidad de obturación
Fuente: (Pix4D, 2019)

La distancia de muestreo en tierra (GSD) indica el tamaño que se captura en cada píxel de la fotografía, es decir su unidad de medida es el cm/px. Conocer el GSD es importante para así ubicar puntos de importancia de un área específica de acuerdo al número de píxel de la fotografía. Para

calcular el GSD, Propeller presenta un cálculo aritmético basándose en los datos presentados en la Figura 4 (Propeller, 2019).

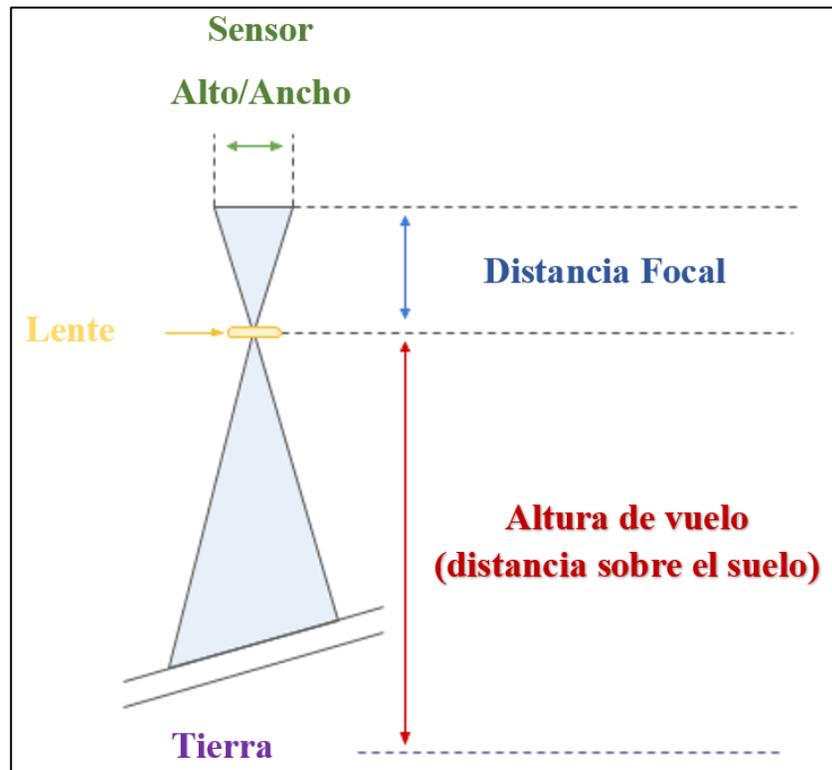


Figura 4. Características principales para determinar el GSD
Fuente: (Propeller, 2019)

Al proyectar cada píxel en la tierra, no todos son totalmente cuadrados por lo cual se utiliza el GSD de valor mayor, considerado el peor escenario. Se tienen 2 fórmulas de acuerdo al ancho y a la altura de la imagen (Propeller, 2019).

$$GSD_{\text{Altura}} = \frac{\text{Altura de vuelo} \times \text{Altura del sensor}}{\text{Distancia Focal} \times \text{Altura de la imagen}} \quad (1)$$

$$GSD_{Ancho} = \frac{\textit{Altura de vuelo} \times \textit{Ancho del sensor}}{\textit{Distancia Focal} \times \textit{Ancho de la imagen}} \quad (2)$$

También se debe considerar que, aun cuando la altura de vuelo sea constante no todas las imágenes capturadas tienen el mismo valor de GSD, esto debido a las elevaciones que puede poseer el terreno en donde se esté trabajando, por lo cual se calcula un GSD promedio (Pix4D, 2019).

1.3. Opciones del sensor de imagen y controlador

Un sensor de imagen está formado por varias celdas fotosensibles de tamaño microscópico, estas celdas fotosensibles o fotositos son conocidos comúnmente como "píxel". Es decir, por ejemplo, que una cámara de 10Mpx posee 10 millones de celdas fotosensibles y cada una de estas celdas tiene un fotodiodo, el cual recibe fotones y al interactuar con los átomos del material genera electrones, esto quiere decir que el fotodiodo convierte la luz en electricidad. Estas celdas no pueden detectar el color, solo detectan la intensidad de la luz y mediante la aplicación de filtros descomponen la luz en tres colores: rojo, verde y azul (RGB por sus siglas en inglés *Red, Green and Blue*), lo cual ayuda a que se pueda observar una imagen a color (Réflex, 2018).

Los sensores de imagen pueden estar elaborados con tecnología CCD (dispositivo de acoplamiento de carga) o tecnología CMOS (semiconductor de óxido metálico complementario), cada una de estas tecnologías tienen sus puntos a favor y en contra. La tecnología CCD tienen un mayor tiempo presentes en el mercado (hace más de 30 años), la principal ventaja de dicha tecnología es que presenta una sensibilidad lumínica mayor, lo cual significa que puede obtener mejores fotografías en ambientes de poca luz, además produce menor ruido que los sensores de tecnología CMOS; la desventaja del sensor CCD es que este ocupa hasta 100 veces más energía

que un sensor CMOS. Los sensores con tecnología CMOS poseen un tiempo menor de lectura, lo cual resulta provechoso al momento de realizar fotografías de alta resolución, además estos sensores tienen un costo más bajo y presentan una gran similitud en cuanto a calidad de imagen frente a los sensores CCD, haciéndolos de esta manera mayormente utilizados (Axis, 2018).

Para el proyecto se va a utilizar un sensor de tecnología CMOS gracias a las prestaciones que brinda, como es una buena calidad de imagen a un menor costo. Los sensores considerados para formar parte del proyecto son: el sensor de imagen CMOS Sony IMX219PQ y el sensor de imagen CMOS OV7670, fabricado por Omnivision. Cada uno de estos sensores brindan diferentes prestaciones y a su vez cada uno necesita de una tarjeta electrónica para su respectivo control.

1.3.1. Sensor de imagen CMOS IMX219PQ y controlador Raspberry Pi Zero W

El sensor de imagen CMOS Sony IMX219PQ pesa 3.2 g y cuenta 5 megapíxeles, lo cual ofrece una alta sensibilidad, imágenes de video de alta velocidad, balance de blancos, detección de iluminación y menor ruido en imagen reducida. Además, este sensor tiene una tecnología OmniBSI de $1.4 \mu\text{m} \times 1.4 \mu\text{m}$ de píxeles para un alto rendimiento, cuenta con área de imagen de $3,68 \times 2,76$ mm, distancia focal de 3,04 mm y puede capturar imágenes con una resolución de hasta 3280×2464 píxeles y videos de alta calidad HD 1080p grabando a 30fps (cuadros por segundo). Dicho sensor es controlado por la tarjeta Raspberry Pi (1, 2, 3B, 3B+ y Zero) (Senthilkumar, Gopalakrishnan, & Sathish Kumar, 2014).



Figura 5. Sensor de imagen CMOS Sony IMX219PQ
Fuente: (*ElectroniLab, 2018*)

La tarjeta de control Raspberry Pi tiene varias versiones, la posible opción para utilizar en el proyecto es la Raspberry Pi Zero W, esto debido a su bajo consumo de energía, menor tamaño y peso. Esta tarjeta electrónica es considerada como un mini computador ya que se puede instalar un sistema operativo con una interfaz gráfica amigable con el usuario, así mismo tiene puertos capaces de conectar un monitor, teclado, mouse y ethernet, teniendo de esta manera un mini computador que puede conectarse a internet y con las ventajas de ser una tarjeta programable. Raspberry Pi Zero W cuenta con varias características detalladas en la Tabla 3.

Tabla 3
Características de tarjeta electrónica Raspberry Pi Zero W

Raspberry Pi Zero W	
Dimensiones [mm]	65mm de largo, 30mm de ancho y 5mm de grosor
Peso [gr]	9
Procesador	Broadcom BCM2835
Memoria RAM	512 MB
CPU Clock	1 GHz
Wi-Fi	Si
Bluetooth	Si
Consumo de amperaje	180 mA
Ranura para tarjeta Micro-SD	Si

Salida de video mini-HDMI a 1080p	Si
Dos conectores micro-USB	Si
Pines de conexión de entradas y salidas digitales	40
Pines de conexión de entradas y salidas analógicas	No
Software	Libre

Fuente: (PiHut, 2018)

La tarjeta electrónica Raspberry Pi Zero W ofrece varias aplicaciones entre las cuales las más destacadas son:

- Mini computador de escritorio, una vez conectado todos los periféricos de entrada y salida a la tarjeta.
- Cámara de seguridad IP.
- Reproductor multimedia.
- Funcionamiento para IPTV.
- Servidor Web.
- Sistema de Almacenamiento Conectado a la Red (NAS por sus siglas en inglés *Network Attached Storage*).
- Transmisión de música y video.
- Capaz de ejecutar juegos de video antiguos.
- Controlador para proyectos electrónicos.
- Domótica.
- Robótica.
- Tablero de control.

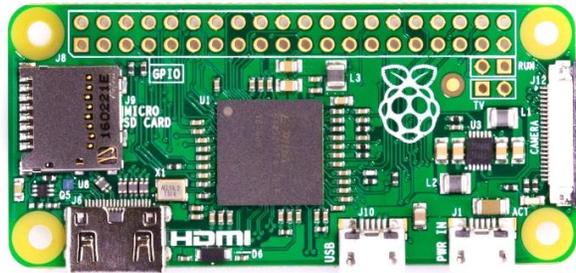


Figura 6. Tarjeta Raspberry Pi Zero W
Fuente: (*RaspberryPi*, 2018)

1.3.2. Sensor de imagen CMOS OV7670 y controlador Teensy 3.6

El sensor de imagen CMOS OV7670 producido por Omnivision, tiene una resolución de 640x480 píxeles, es decir cuenta con 0,3 megapíxeles, capaz de capturar las imágenes hasta 30fps. Este sensor tiene un peso de 9.07 g y brinda la posibilidad de realizar procesamiento de imágenes ya que es un sistema en un chip (SoC por sus siglas en inglés *System on Chip*), entre las funciones que puede efectuar se tiene: balance de blancos, control de exposición, saturación de color, control de tono. Además, cuenta con una sensibilidad de 1.3v, distancia focal de 3,60 mm, un lente de alta calidad de 8/6 mm y tiene tecnología de cobertura de píxel de 3,6 μm x 3,6 μm . Este sensor puede ser controlado por varias versiones de Arduino, el controlador elegido para regir sobre este sensor es la tarjeta electrónica Teensy 3.6 (Ordóñez & Oñate, 2016).

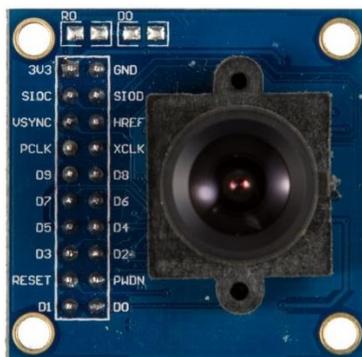


Figura 7. Sensor de imagen CMOS OV7670 por Omnivision
Fuente: (Naylamp, 2018)

La tarjeta electrónica Teensy versión 3.6 de igual manera ha sido considerada para ser empleada en el proyecto, ya que esta versión cuenta con un puerto micro SD, además que presenta poco consumo de energía. En la tabla 4 se detallan las características de la tarjeta Teensy 3.6.

Tabla 4
Características de tarjeta electrónica Teensy 3.6

	Teensy 3.6
Dimensiones [mm]	62.3mm de largo, 18mm de ancho y 4.2mm de grosor
Peso [gr]	9
Procesador	ARM Cortex-M4 with Floating Point Unit
Memoria RAM	256 K
CPU Clock	180 MHz
Wi-Fi	No
Bluetooth	No
Consumo de amperaje	180 mA
Ranura para tarjeta Micro-SD	Si
Salida de video mini-HDMI a 1080p	No
Dos conectores micro-USB	1 conector micro USB
Pines de conexión de entradas y salidas digitales	62
Pines de conexión de entradas y salidas analógicas	25
Software	Libre

Fuente: (MicroRobotics, 2018)



Figura 8. Tarjeta Teensy 3.6
Fuente: (Teensy, 2018)

La tarjeta electrónica Teensy 3. 6 ofrece varias aplicaciones entre las cuales las más destacadas son:

- Controlador para proyectos electrónicos.
- Domótica.
- Adquisición de señales analógicas.
- Mezclador de audio.
- Control remoto.
- Robótica.
- Tablero de control.

1.4. Controlador y sensor de imagen elegidos

La tarjeta electrónica Raspberry Pi Zero W como controlador y el sensor de imagen CMOS Sony IMX219PQ, son los dispositivos que se van a utilizar en el presente proyecto, esta selección se la hizo tomando en cuenta varios parámetros que son indispensables para la aplicación en el proyecto; se destacan los siguientes:

- Calidad de video, resolución 1920x1080 píxeles (Full HD)
- CPU Clock

- Energía requerida
- Alternativas para conexión

El sensor de imagen CMOS Sony IMX219PQ junto al sistema en un chip (SoC por sus siglas en inglés *System on Chip*) BCM2835, intervienen en la captura de videos e imágenes. El funcionamiento de este sistema embebido se explica en la Figura 9 (Jones, 2018).

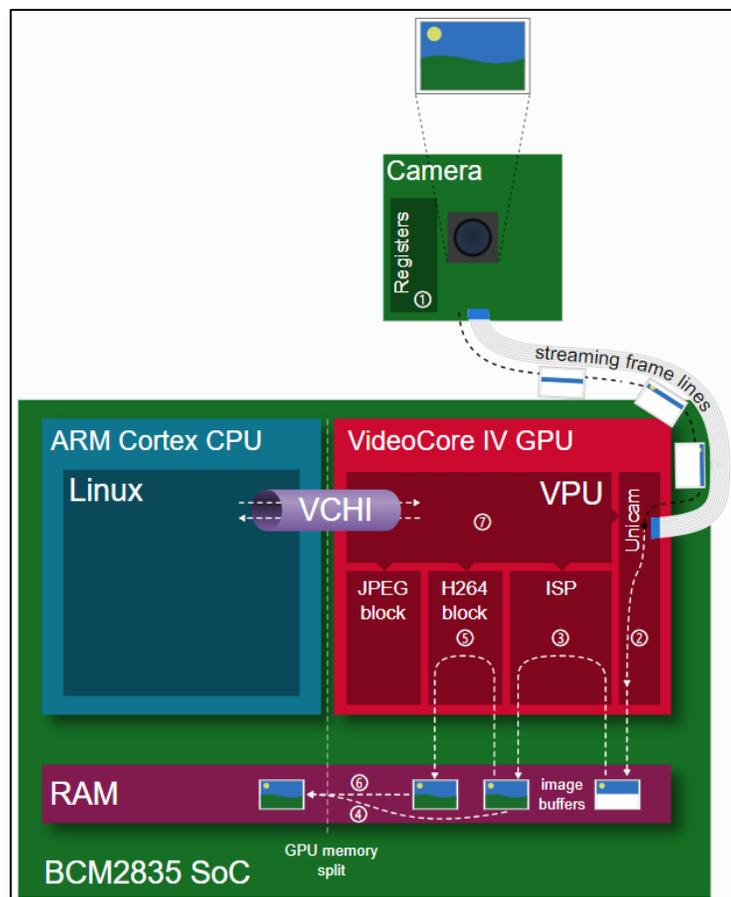


Figura 9. Diagrama de funcionamiento del procesamiento de imagen o video
Fuente: (Jones, 2018)

Donde:

1. El sensor de imagen captura las imágenes mejorando la relación de señal versus ruido, dicho sensor se encuentra conectado a un módulo donde los píxeles se agrupan y se

graban en registros y son enviadas en líneas de tramas a la unidad de procesamiento gráfico (GPU, del inglés *Graphics Processing Unit*) (Jones, 2018).

2. Las líneas de trama son transferidas a la GPU a través de la interfaz serie para cámara (CSI2 por sus siglas en inglés *Camera Serial Interface*), donde el componente Unicam recibe los datos y los escribe en la memoria RAM (Jones, 2018).
3. El procesador de señal de imagen (ISP por sus siglas en inglés *Image Signal Processor*) procesa los datos recibidos de la imagen, entre los procesamientos que realiza se tiene: transposición, compensación de nivel de negro, balance de blancos, sombreado de la lente, ganancia digital, desmosaico, reducción de ruido, afilado, procesamiento de color, cambio de tamaño y mejora de distorsión (Jones, 2018).
4. En este punto los datos de la trama son copiados directamente a la CPU, esto sucede cuando el formato de salida de las imágenes capturadas no es codificado como RGB, YUV, entre otros (Jones, 2018).
5. Cuando se requiere producir una codificación en algún formato de imagen o video, se tienen bloques de codificación, como por ejemplo un bloque de codificación para el formato de imagen JPEG y otro bloque para el formato de video H264.
6. La salida codificada anteriormente se copia en el CPU mediante el acceso directo a memoria (DMA, del inglés *Direct Memory Access*) (Jones, 2018).
7. La unión de los componentes anteriormente mencionados conforma la unidad de proceso de video (VPU por sus siglas en inglés *Video Process Unity*). Aquí se tiene la imagen o video disponible para hacer uso de la misma (Jones, 2018).

Otro motivo de suma importancia para elegir estos dispositivos es la escalabilidad que presenta la tarjeta electrónica Raspberry Pi Zero W, la cual es una excelente opción para las próximas etapas a desarrollar en el proyecto, esto debido a las características que ofrece este mini computador.

1.5. Baterías

Un elemento determinante en un dron es la batería, la cuál es responsable de suministrar la energía necesaria al dron para que este pueda realizar el vuelo programado. Las baterías convierten la energía química en energía eléctrica, donde su unidad básica es la celda. En una batería se puede tener una o varias celdas que pueden estar conectadas en paralelo o en serie, esto dependiendo de la capacidad y tensión que se desee tener. Las baterías son desarrolladas de diferentes tecnologías como: níquel-cadmio (Ni-Cd), plomo-ácido (Pb-Ácido), litio-ion (Li-Ion), litio-polímero (Li-Po), entre otras. Además, según la tecnología con la que se encuentre elaborada la batería, también se pueden clasificar según su ciclo de carga y descarga, de esta manera se tienen dos grupos: las baterías primarias y las baterías secundarias (Viera Pérez, 2003).

Las baterías primarias son de pequeño tamaño utilizadas principalmente en dispositivos que consumen poca energía; no permiten un ciclo de carga y descarga, ya que cuando la batería ha sido descargada su vida útil termina. Es decir, una vez utilizada la batería debe ser desechada. Las baterías secundarias son las más utilizadas, esto debido a que su capacidad va desde miliamperios-hora hasta decenas o centenas de amperios-hora, además otra característica importante que presentan, es que permite un número finito de ciclos de carga y descarga (Sigcha Pilatuña, 2018).

Las baterías de uso común en drones son las baterías secundarias de litio, estas baterías se subdividen en dos tipos: Li-Po y Li-Ion.

- **Baterías de polímero de litio (Li-Po):** Conocidas comúnmente como celdas de litio, las cuales normalmente entregan una tensión de 5 voltios. Dichas celdas se encuentran conectadas en paralelo para así poder incrementar la capacidad de corriente. Son de forma rectangular o cuadrada con una consistencia suave y de poco peso (Betancur, 2016).
- **Baterías de iones de litio (Li-Ion):** Estas baterías utilizan sales de litio para producir las reacciones químicas que liberan energía, son de forma cilíndrica, además presentan un menor desgaste con respecto a sus ciclos de carga y descarga. Las baterías Li-Ion tienen una alta sensibilidad a altas temperaturas, pudiendo de esta manera llegar a estropearse o incluso puede explotar. La solución ante esta característica negativa que presentan dichas baterías, es acoplar un circuito electrónico de protección, razón por lo cual su costo de producción aumenta (Betancur, 2016).

1.6. Modelos de baterías

Para representar el modelo de una batería, sin tomar en cuenta el modelo más complejo, el electroquímico que tiene que ver con las reacciones químicas que se producen dentro de la batería, se puede desglosar en tres categorías, desde el más sencillo hasta el modelo más complejo se tiene: modelo ideal, modelo comportamental y modelo del circuito equivalente (Chang, 2013).

1.6.1. Modelo ideal

Este modelo es el más sencillo de todos y solo se lo utiliza cuando el estudio de la batería no es de utilidad o de suma importancia, dicho modelo es representado como una fuente de voltaje ideal que cuenta con energía ilimitada (Chang, 2013).

1.6.2. Modelo comportamental

Dicho modelo estaba basado en la experiencia, esto quiere decir que se realizan experimentos donde a la batería se le aplican diferentes cargas, obteniendo variaciones en el comportamiento de la batería y aprendiendo de esto. Para este tipo de modelado se hace uso de técnicas de control como lógica borrosa o difusa y redes neuronales, las cuales comúnmente usan variables como: corriente de entrada o salida, voltaje y la temperatura en la batería. Las salidas de este tipo de modelo vienen a ser el estado de carga de la batería o los valores de descarga que se tuvo en el voltaje (Sobczak & Samolyk, 2013).

1.6.3. Modelo del circuito equivalente

Para este modelo se utilizan componentes electrónicos como resistencias y capacitores. Dependiendo del grado de precisión que se desee obtener se puede subdividir al modelo de circuito equivalente en tres modelos: modelo de batería simple, modelo avanzado de batería simple y el modelo de batería Thevenin (Sobczak & Samolyk, 2013).

- **Modelo de batería simple.**

Aquí se tiene un circuito lineal básico, conformado de elementos pasivos como lo es una resistencia y haciendo uso de una batería con voltaje ideal conectado en serie y en circuito abierto. Esta forma de conexión se la puede ver en la Figura 10. Este modelo no es capaz de describir el comportamiento de la batería ya que hace falta relacionar la resistencia interna con diferentes estados de carga (SOC) (Sobczak & Samolyk, 2013).

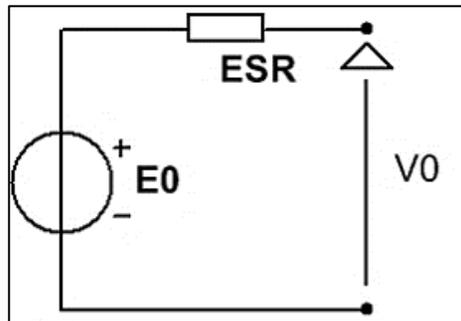


Figura 10. Modelo de batería simple
Fuente: (Sobczak & Samolyk, 2013)

Donde:

- V0: Tensión de los terminales de la batería.
- E0: Voltaje del circuito abierto.
- ESR: Resistencia interna en serie.

- **Modelo avanzado de batería simple.**

La representación gráfica de este modelo es el mismo de la Figura 10 y como su nombre lo indica, este modelo es una versión avanzada o mejorada del modelo de batería simple, donde la diferencia que se tiene es adherir dependencia de la resistencia interna en el estado de carga. De esta manera la relación entre la ESR y el SOC se describe mediante la siguiente ecuación (Sobczak & Samolyk, 2013):

$$ESR = \frac{R_0}{SOC^k} \quad (3)$$

Donde:

- R₀: Es la resistencia cuando la batería se encuentra totalmente cargada.
- SOC: Estado de carga.
- k: Coeficiente de capacidad de la batería.

- **Modelo de batería Thevenin.**

Este modelo fue diseñado con el fin de estudiar el comportamiento transitorio de la batería, dicho modelo presenta la desventaja de que los valores de los elementos dependen del estado de carga (SOC) y de otras características propias de la batería (Sobczak & Samolyk, 2013). En la Figura 11 se puede apreciar el modelo gráfico de Thevenin.

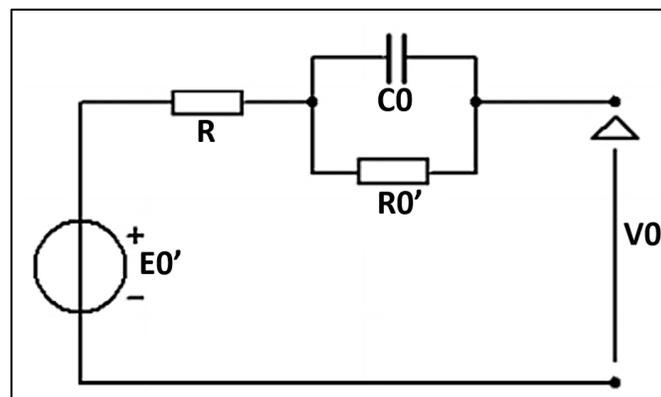


Figura 11. Modelo de batería Thevenin
Fuente: (Sobczak & Samolyk, 2013)

Donde:

- $E0'$: Voltaje ideal de la batería.
- R : Resistencia interna.
- $R0'$: Resistencia entre electrodos y electrolito, en paralelo con la capacitancia.
- $C0$: Capacitancia indicando la capacidad de almacenamiento de carga entre las placas paralelas.

1.7. Estado de carga (SOC)

El estado de carga es una de las características más importantes de una batería, ya que con este parámetro se puede ver la capacidad que le queda a la batería dependiendo de la carga a la que este

alimentando, esto se hace mediante una relación entre la capacidad nominal y la capacidad actual de la batería. Donde la capacidad nominal es la que viene dada por el fabricante, representando la máxima cantidad de carga que la batería puede almacenar. Dicha relación se la define en la siguiente ecuación (Chang, 2013).

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} \quad (4)$$

Donde:

- Q_n : Capacidad nominal.
- $Q(t)$: Capacidad actual.

Para la estimación del estado de carga los métodos matemáticos se pueden clasificar según la metodología aplicada, pudiendo ser: medición directa, sistemas adaptativos y estimación tradicional (Chang, 2013).

1.7.1. Medición o evaluación directa

Para la medición directa se debe conocer el voltaje en los terminales de la batería y la impedancia interna de la batería. Aquí principalmente se usa el método de voltaje de circuito abierto (OCV, por sus siglas en inglés *Open circuit voltage*), donde se mide el voltaje de la batería en los terminales conectados a una carga, teniendo una descarga lineal. La desventaja es que este tipo de método no puede ser usado en tiempo real, ya que los voltajes toman su tiempo en estabilizarse, además las mediciones tomadas del voltaje varían por otras características internas y externas a la batería como la edad que tiene la celda, el nivel de voltaje nominal y la temperatura del clima (Sobczak & Samolyk, 2013).

1.7.2. Sistema adaptativo

En esta metodología se pueden aplicar los métodos de redes neuronales y filtro de Kalman, donde en ambos métodos se tienen variables de entrada o salida como temperatura, voltaje y corriente de la batería. En el caso de usar el método de filtro de Kalman se aplican variables y ecuaciones de estado representando a las variables de entrada y salidas del sistema. Mientras que para el caso de redes neuronales se modela a la batería como una red neuronal, la cual va aprendiendo y adaptándose a los cambios que sufre según su ciclo de descarga. Estos dos métodos pueden ser empleados en tiempo real obteniendo resultados eficientes, pero a cambio requieren de un gran consumo computacional (Watrin, Blunier, & Miraonui, 2012).

1.7.3. Estimación tradicional

Se destaca por emplear el método de la estimación basado en la intensidad, o también nombrado como el medidor amperios-hora (A/h) de Coulomb, dicho método emplea una ecuación donde integra la corriente total y la provista por la batería (Zabaleta, Biurrun, & Pascual, 2016), la ecuación esta descrita de la siguiente manera:

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\eta}{C} \times \int_{t_0}^t I(t) \times dt \quad (5)$$

Donde:

- SOC_0 : Estado de carga inicial (%).
- C : Capacidad de la batería (mAh).
- η : Rendimiento de la batería.
- $I(t)$: Corriente de batería (mA).
- t_0 : Instante inicial.

El valor del rendimiento de la batería es: $\eta=1$ para la condición de carga y $\eta < 1$ para la condición de descarga, según el estudio realizado por Buchman, se demostró que el rendimiento de la batería o coeficiente de eficiencia coulombica oscila en un valor de 0,991 a 0,995 sometiendo una batería a 15 ciclos de carga y de 0,995 a 0,999 con 30 ciclos de carga (Buchmann, 2017). Las corrientes salientes y entrantes a la batería se los mide mediante un sensor, para así obtener el valor que va a ser integrado. Este método es preciso y práctico para implementarlo en baterías para medir el SOC aplicando un balance energético (Zabaleta, Biurrun, & Pascual, 2016).

1.8. Sensor para la medición de corriente.

Para el sistema que controlará el consumo de energía, se ha elegido un sensor de corriente de efecto Hall ACS712. Generalmente es utilizado en aplicaciones de monitoreo y control de motores, protección para fallas generadas por sobrecorriente, gestión y monitoreo de estados de carga, entre otras. Dicho sensor puede trabajar con corriente de 0 a 30 amperios, para utilizar el sensor de corriente se deben considerar los parámetros de sensibilidad, nivel de ruido y el rango de trabajo, puesto que en cada opción se maneja con temperaturas diferentes. Las características de rendimiento del sensor se lo pueden observar en la Tabla 5.

Tabla 5

Características del rendimiento del sensor de corriente ACS712 30 A

Características	Símbolo	Condiciones de prueba	Mínimo	Tipo	Máximo	Unidades
Rango de precisión optimizado	I_P		-30		30	A
Sensibilidad	$Sens$	En todo el rango de I_P , $T_A = 25^\circ\text{C}$	64	66	68	mV/A
Ruido	$V_{NOISE(PP)}$	Pico a pico, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 66 mV/A sensibilidad programada	-	7	-	mV

		$C_F = 47 \text{ nF}, C_{out} =$ <i>abierto, banda 2kHz</i>				
Pendiente de sensibilidad de corriente cero	$\Delta I_{OUT(Q)}$	$T_A = -40 \text{ }^\circ\text{C a } 25 \text{ }^\circ\text{C}$	-	-0.35	-	mV/°C
		$T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C a } 150 \text{ }^\circ\text{C}$	-	-0.08	-	mV/°C
Pendiente de sensibilidad	$\Delta Sens$	$T_A = -40 \text{ }^\circ\text{C a } 25 \text{ }^\circ\text{C}$	-	0.007	-	mV/A/°C
		$T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C a } 150 \text{ }^\circ\text{C}$	-	-	-	mV/A/°C
				0.002		
Error de salida total	E_{TOT}	$I_P = \pm 30 \text{ A}, T_A = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	-	± 1.5	-	%

Fuente: (Allegro MicroSystems, 2019).

La corriente que se requiere medir se convierte en un voltaje proporcional gracias al sensor de efecto Hall. En el microcontrolador ACS712 se encuentra el valor pico del voltaje y aplicando operaciones algebraicas calcula el valor RMS de la corriente de carga (Allegro MicroSystems, 2019). Debido a la aplicación a la cual será sometido el sensor se debe tomar en cuenta la sensibilidad que presenta de acuerdo a la temperatura, dichas características se pueden observar en las siguientes figuras.

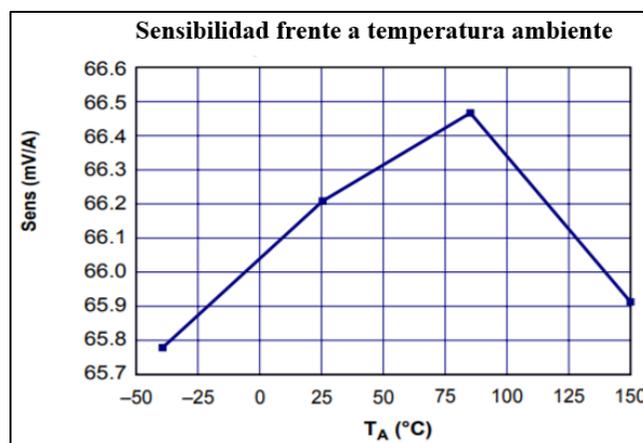


Figura 12. Relación entre la sensibilidad del sensor versus la temperatura del ambiente
Fuente: (Allegro MicroSystems, 2019)

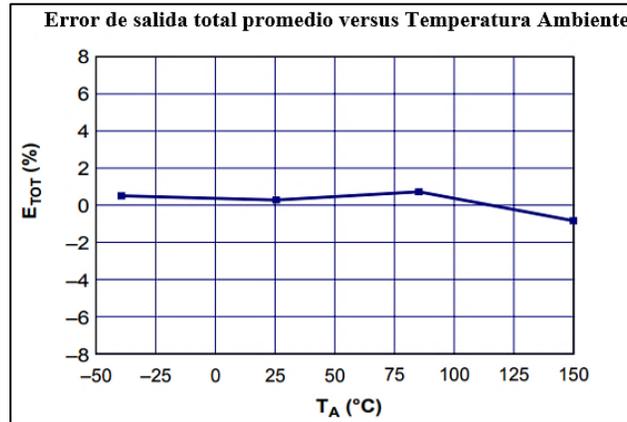


Figura 13. Error de la salida del sensor frente a la temperatura del ambiente
Fuente: (Allegro MicroSystems, 2019)

Con los datos de condiciones ambientales detallados en la Tabla 1, se está al tanto que el sensor enfrentará temperaturas de $-4,5$ °C a 24 °C, por lo cual gracias a la Figura 12 se puede estimar que la sensibilidad se encontrará en el rango de 66 mV/A a $66,2$ mV/A. Mientras que la Figura 13 indica que se espera tener un error total a la salida entre $0,02$ % al $1,2$ %. En la Figura 14 se presenta una pendiente con los valores de voltaje proporcionales a la corriente detectada por el sensor.

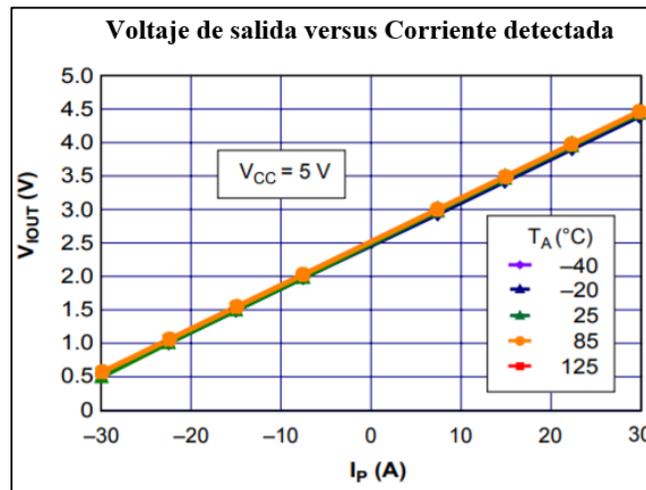


Figura 14. Voltaje de salida frente a la corriente detectada por el sensor
Fuente: (Allegro MicroSystems, 2019)

Dicha figura presenta una relación lineal entre el voltaje y la corriente, por lo cual se puede representar con la ecuación de la recta de la siguiente manera:

$$V = mI + 2,5 \quad (6)$$

Donde:

- V: voltaje entregado por el sensor.
- m: es la pendiente representada por la sensibilidad del sensor.
- I: corriente en relación al voltaje V.
- Se tiene el valor constante de 2,5 voltios para 0 amperios.

CAPÍTULO II DESARROLLO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO PARA FOTOGRAMETRÍA

El diseño e implementación de un sistema electrónico para fotogrametría es clave en el proyecto, por esto en el presente capítulo se detallarán todos los pasos que se han realizado para desarrollar un circuito electrónico, haciendo uso de una tarjeta electrónica Raspberry Pi Zero W como controlador y el sensor de imagen CMOS Sony IMX219PQ. Dicho controlador será programado para que cumpla con una serie de parámetros establecidos en el proyecto como es la velocidad de obturación de la cámara, niveles de brillo, sensibilidad, entre otros. Se pretende que, a la hora de implementar el circuito electrónico, este sea pequeño para que no ocupe mucho espacio y su peso no exceda a 500 gramos, peso máximo que soporta el dron Event E386 donde se implementará el sistema electrónico.

2.1. Especificaciones requeridas

Dentro del proyecto se requiere implementar un sistema fotográfico compacto, que posea una resolución mínima HD de 1366 x 768 píxeles a 30 fps, puesto que con este número de píxeles las imágenes capturadas cuentan con una definición apta para trabajar en procesamiento de imágenes, evitando la pérdida de datos. A su vez, el sistema debe presentar la función de manipular el nivel de brillo, la sensibilidad del sensor a la luz ambiental (ISO, siglas del inglés *International Standards Organization*) y velocidad de obturación para superponer fotogramas al menos en un 60%. La posición del sistema fotográfico en el dron debe permitir capturar fotogramas de manera ortogonal. Dichas especificaciones son dadas por los ingenieros que conforman el grupo de investigación. Para cumplir estos requisitos se ha elegido trabajar con el sensor de imagen CMOS Sony

IMX219PQ, dicho componente cumple con las especificaciones requeridas, además gracias a que es gobernado por la tarjeta electrónica Raspberry Pi Zero W se puede realizar una programación basada en las necesidades del proyecto como es la opción de filmar video o capturar imágenes cada cierto tiempo en base a la misión programada para el dron.

2.2. Configuración previa

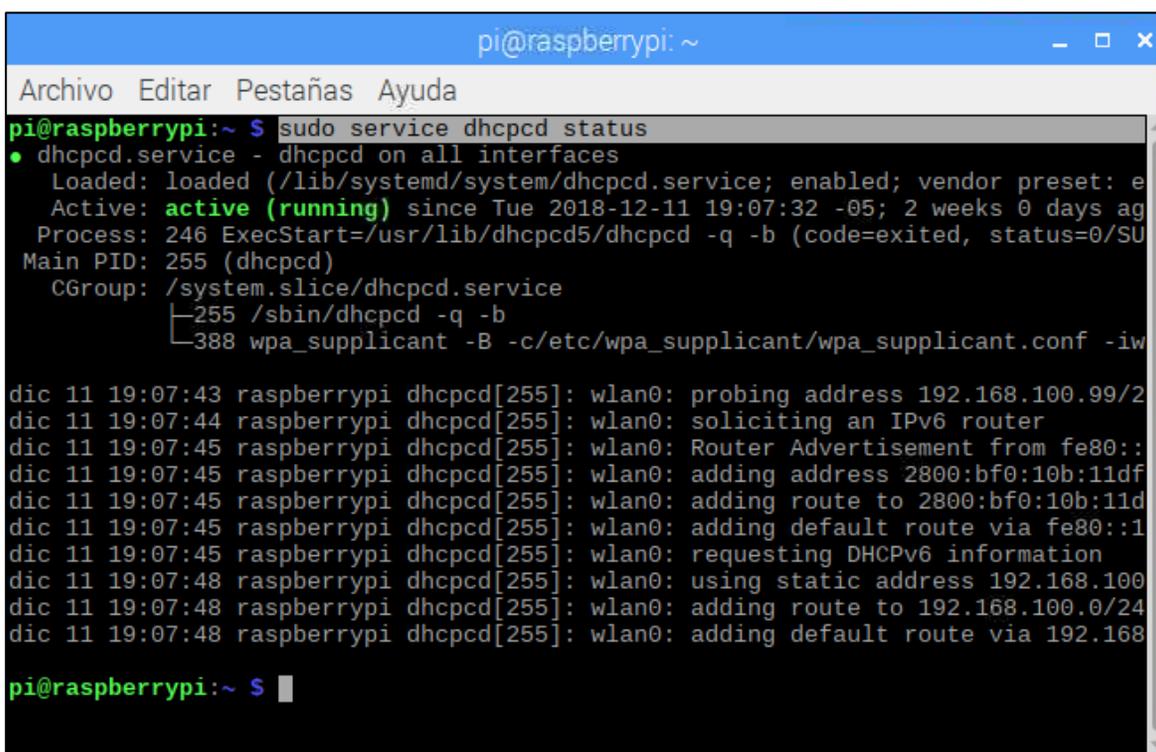
Previo al diseño del circuito electrónico que será parte del sistema fotográfico, se debe realizar la configuración y programación de la tarjeta Raspberry Pi Zero W, las cuales serán detalladas a continuación.

Se procede a descargar la imagen de disco del sistema operativo Raspbian de la página web oficial de Raspberry Pi, el cual será grabado en una tarjeta microSD de 16 GB. Para instalar la imagen de disco descargada se emplea la herramienta Etcher, programa de código abierto, el cual permite grabar una imagen de disco en una tarjeta micro SD. El programa Etcher cuenta con una interfaz gráfica bastante intuitiva, donde se debe seleccionar el sistema operativo descargado, la ruta de destino y en el transcurso de unos minutos la instalación habrá concluido. Una vez finalizada la instalación en la tarjeta micro SD se procede a colocarla en la Raspberry Pi Zero W.

Antes de energizar por primera vez la tarjeta, se conecta en los puertos de entrada un teclado y mouse, en el puerto de salida de video un cable mini HDMI que se conecta a un monitor. Para encender la tarjeta se conecta un cable micro USB a un cargador de 5 voltios y el sistema arrancará automáticamente. A continuación, se procede a configurar una dirección IP estática para poder establecer una conexión computador-tarjeta, de esta manera se puede programar la tarjeta desde el computador empleando el teclado y el mouse del mismo, mediante el programa de Windows para

conexión a escritorio remoto. De esta manera se tendrá un sistema portable capaz de ser trasladado y manipulado desde un computador vía Wifi.

Para configurar la dirección IP remota se verifica que se encuentre activo el protocolo de configuración de host (DHCP, por sus siglas en inglés *Dynamic Host Configuration Protocol*) con el cual se pueda asignar una dirección IP a la Raspberry. Se abre una nueva ventana del terminal de Raspbian y se introduce el comando que se puede apreciar en la Figura 15, al ingresar dicho código, entrega como resultado la información del estado del servicio, en este caso el servicio está en modo activo.



```
pi@raspberrypi: ~
Archivo  Editar  Pestañas  Ayuda
pi@raspberrypi:~$ sudo service dhcpd status
• dhcpd.service - dhcpd on all interfaces
  Loaded: loaded (/lib/systemd/system/dhcpd.service; enabled; vendor preset: e
  Active: active (running) since Tue 2018-12-11 19:07:32 -05; 2 weeks 0 days ag
  Process: 246 ExecStart=/usr/lib/dhcpd5/dhcpd -q -b (code=exited, status=0/SU
  Main PID: 255 (dhcpd)
  CGroup: /system.slice/dhcpd.service
          └─255 /sbin/dhcpd -q -b
            └─388 wpa_supplicant -B -c/etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf -iw

dic 11 19:07:43 raspberrypi dhcpd[255]: wlan0: probing address 192.168.100.99/2
dic 11 19:07:44 raspberrypi dhcpd[255]: wlan0: soliciting an IPv6 router
dic 11 19:07:45 raspberrypi dhcpd[255]: wlan0: Router Advertisement from fe80::
dic 11 19:07:45 raspberrypi dhcpd[255]: wlan0: adding address 2800:bf0:10b:11df
dic 11 19:07:45 raspberrypi dhcpd[255]: wlan0: adding route to 2800:bf0:10b:11d
dic 11 19:07:45 raspberrypi dhcpd[255]: wlan0: adding default route via fe80::1
dic 11 19:07:45 raspberrypi dhcpd[255]: wlan0: requesting DHCPv6 information
dic 11 19:07:48 raspberrypi dhcpd[255]: wlan0: using static address 192.168.100
dic 11 19:07:48 raspberrypi dhcpd[255]: wlan0: adding route to 192.168.100.0/24
dic 11 19:07:48 raspberrypi dhcpd[255]: wlan0: adding default route via 192.168

pi@raspberrypi:~$
```

Figura 15. Estado del servicio DHCP

Posteriormente se va a configurar la dirección IP estática en la tarjeta electrónica, en este caso se conectará a una red inalámbrica local (WLAN, por sus siglas en inglés *Wireless Local Area Network*), para ingresar la dirección IP deseada se debe editar el archivo *dhcpcd.conf* para esto es necesario otorgar permisos de super usuario, razón por lo cual se ocupa el comando `sudo`. La línea de código a ingresar en el terminal se puede ver en la Figura 16:

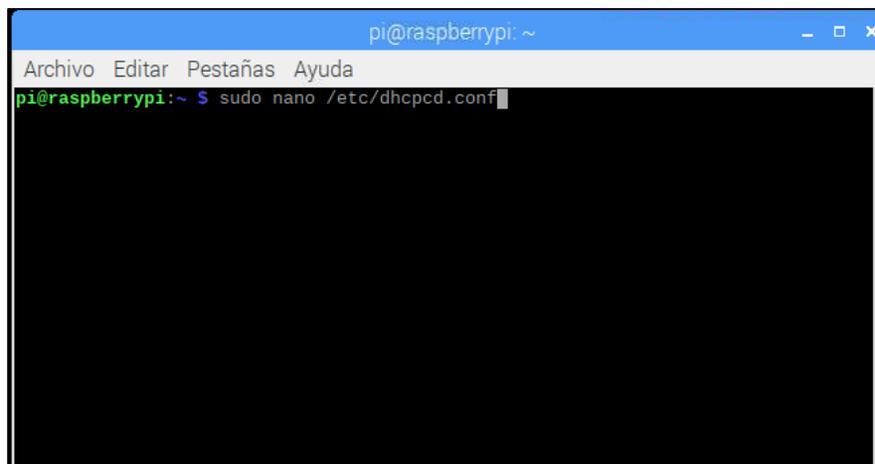
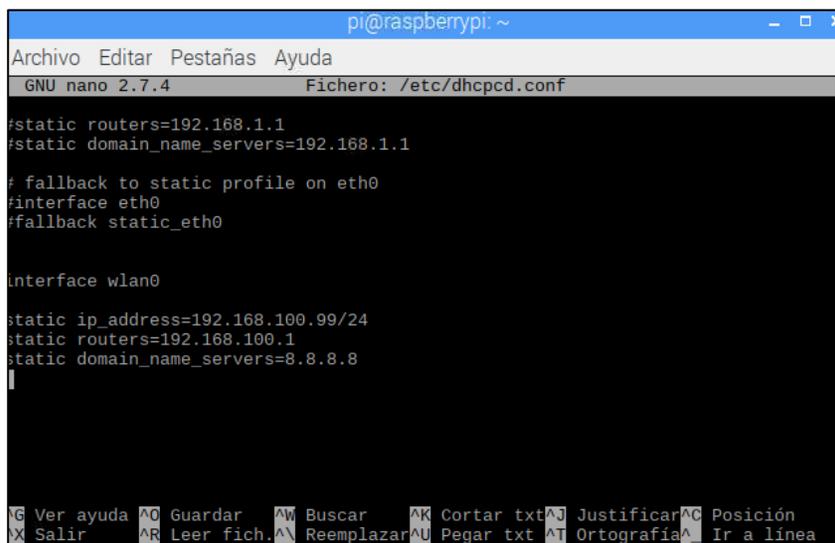
A screenshot of a terminal window on a Raspberry Pi. The window title is 'pi@raspberrypi: ~'. The menu bar shows 'Archivo', 'Editar', 'Pestañas', and 'Ayuda'. The terminal prompt is 'pi@raspberrypi:~' and the command 'sudo nano /etc/dhcpcd.conf' has been entered, with a cursor at the end of the line. The rest of the terminal is black.

Figura 16. Creación del archivo para arranque de programa

Se abrirá un archivo editable, en el cual hay que asignar la dirección IP estática acompañada con el sufijo 24 que es la abreviatura que se le da a la máscara 255.255.255.0, el código que se debe agregar se observa en la Figura 17.



```
pi@raspberrypi: ~
Archivo Editar Pestañas Ayuda
GNU nano 2.7.4 Fichero: /etc/dhcpd.conf
#static routers=192.168.1.1
#static domain_name_servers=192.168.1.1

# fallback to static profile on eth0
#interface eth0
#fallback static_eth0

Interface wlan0

static ip_address=192.168.100.99/24
static routers=192.168.100.1
static domain_name_servers=8.8.8.8

^G Ver ayuda ^O Guardar ^W Buscar ^K Cortar txt ^J Justificar ^C Posición
^X Salir ^R Leer fich. ^N Reemplazar ^U Pegar txt ^T Ortografía ^_ Ir a línea
```

Figura 17. Asignación de dirección IP estática

Se guardan los cambios realizados al archivo *dhcpd.conf* y se reinicia a la tarjeta Raspberry para que se apliquen los cambios. Para comprobar que se han generado los cambios, basta con realizar una prueba de ping entre el computador y la tarjeta. Ahora se emplea la herramienta de conexión de escritorio remoto de Windows para ingresar a la Raspberry Pi W con la dirección IP estática asignada e insertando el usuario: pi y la clave: raspberry.

Para hacer uso de la cámara en Raspberry, se debe configurar el sistema operativo dando permisos de super usuario para activar el módulo de la cámara. Para esto se ingresa la línea de código:

```
sudo raspi - config.
```

Se abrirá una pantalla como la de la figura, en donde se selecciona la opción *Interfacing Options*, dentro de esta opción se escoge *Camera* y se habilita colocando en modo *enabled*.

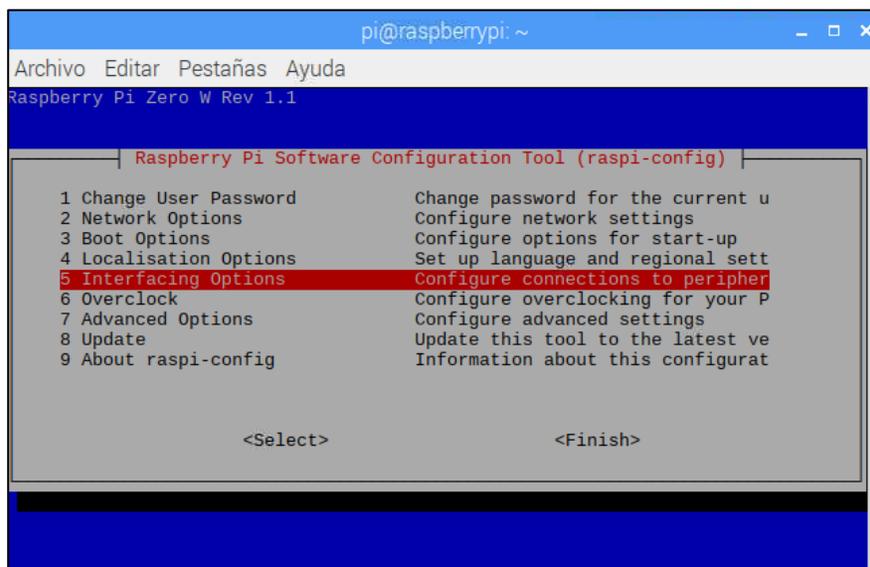


Figura 18. Habilitación del módulo de cámara de Raspberry Pi Zero W

2.3. Programación en lenguaje Python

Concluida la configuración, se tendrá operativo el sensor de imagen, listo para ser programado según las necesidades del proyecto. La programación para que funcione el sistema electrónico se la realizará en lenguaje Python, cabe recalcar que el programa trabajará en tiempo real. Para editar dicho código se utiliza el programa Thonny (Th) y el compilador Python 3 (IDLE), ambos programas son de licencia libre y presentan una interfaz amigable al usuario para programar.

Para el proyecto es necesario obtener videos o imágenes con una resolución mínima de 1366 x 768 píxeles, para que en la etapa de procesamiento de las imágenes se eviten las pérdidas de datos. Hay que tomar en cuenta que el dron de ala fija tiene una velocidad crucero de 12 m/s y que cada vuelo puede durar aproximadamente hasta 30 minutos (1800 segundos). Por lo tanto, se debe crear un algoritmo que sea capaz de captar fotogramas cada determinado tiempo y de esta manera evitar pérdida de datos. Además, en el código se debe implementar la opción para grabar video y tanto para la captura de fotogramas y de videos se debe tener en cuenta las características

que se le debe otorgar a la cámara como es el autoenfoco, resolución, sensibilidad ISO, brillo, contraste, tamaño de la imagen, nombre y la dirección donde van a ser almacenados los datos. Se estima colocar un intervalo de tiempo para capturar 1 fotograma por segundo. Con dicho intervalo de tiempo, la velocidad crucero del dron y la duración del vuelo, se puede calcular la cantidad de imágenes que se capturan y la distancia recorrida por el dron.

$$\textit{Distancia recorrida} = \textit{Tiempo de vuelo} \times \textit{Velocidad crucero} \quad (7)$$

$$\textit{Distancia recorrida} = 1800 [s] \times 12 \left[\frac{m}{s} \right]$$

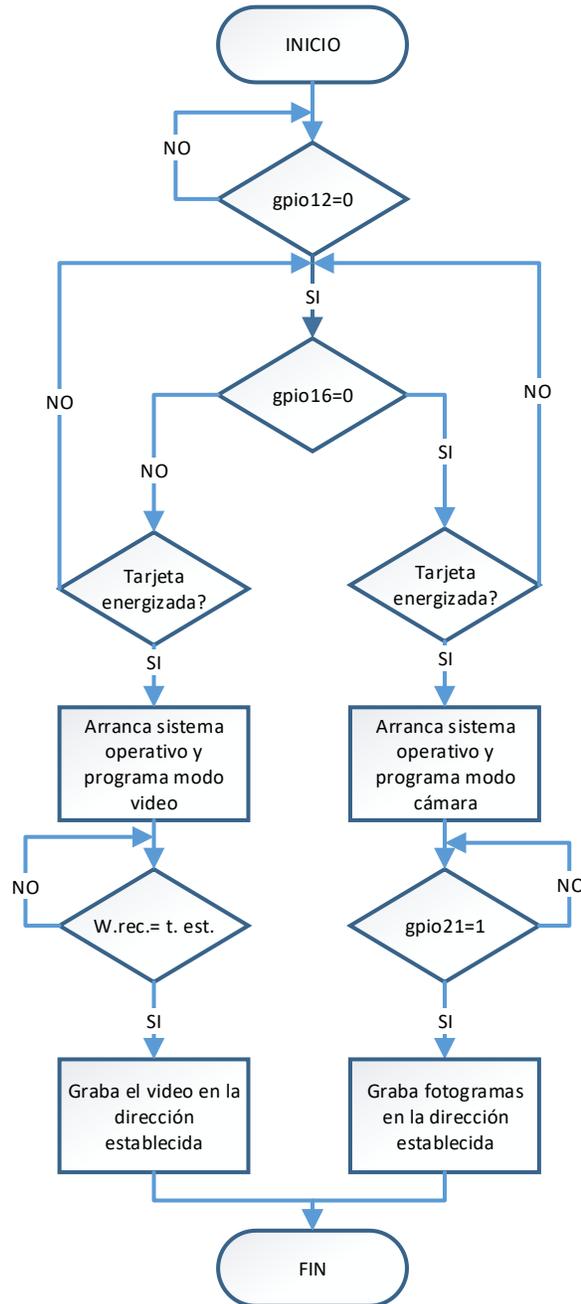
$$\textit{Distancia recorrida} = 21600 [m]$$

$$\textit{Imágenes capturadas} = \textit{Tiempo de vuelo} \times \textit{Intervalo de tiempo} \quad (8)$$

$$\textit{Imágenes capturadas} = 1800 [s] \times 1 \left[\frac{\textit{fotograma}}{s} \right]$$

$$\textit{Imágenes capturadas} = 1800 [\textit{fotogramas}]$$

El código de programación debe poseer la característica de poder elegir la opción de funcionamiento, es decir, si al iniciar el sistema se requiere capturar fotogramas o grabar video en alta resolución. Esto se hace al habilitar los puertos de entrada o salida digitales (GPIO) de la tarjeta Raspberry, de esta manera se puede conectar un interruptor DIP para las dos opciones de inicio, donde: 1 = modo video y 0 = modo cámara. Adicionalmente se plantea colocar dos interruptores más. El primero cumple la función de terminar el proceso de captura de fotogramas, mientras que el segundo interruptor sirve para apagar la tarjeta, con esto se garantiza el apagado seguro, al evitar el riesgo de que uno o varios componentes del circuito electrónico sufran un desperfecto. En la Figura 19 se puede observar el diagrama de flujo del algoritmo que se deberá elaborar.



Donde:

gpio12 = switch de apagado(1 o 0).

gpio16 = switch de selección de modo de funcionamiento (1 o 0).

gpio21 = switch finalización de captura de fotografamas (1 o 0).

W.rec. = Tiempo de grabación de video establecido(tiempo en segundos).

Figura 19. Diagrama de flujo del algoritmo a implementar para el sistema de fotogrametría.

En el código se emplean librerías propias de Raspberry Pi y se hace un llamado al programa MP4Box. El conversor MP4Box se instala desde la consola dando permisos de super usuario, dicho programa es utilizado para convertir el video capturado por el sensor de imagen a formato de video MP4, ya que la cámara de Raspberry graba el video en formato H264. La conversión del video se hace de manera automática una vez concluido el intervalo de tiempo de grabación de video. El código realizado sigue una estructura de jerarquización.

Es necesario realizar ciertas configuraciones para que las imágenes y videos tengan una resolución que cumpla con los parámetros de fotogrametría, en el código del Anexo A1 se programó el nivel de brillo, resolución, sensibilidad ISO, compensación de exposición y la velocidad del obturador. En el algoritmo inicial se obtuvo 124 líneas de código posteriormente se ejecutó una optimización del código, el motivo de optimizar es para reducir el procesamiento computacional de la tarjeta electrónica, de esta manera se tiene un menor consumo de energía, aumentando la autonomía del sistema fotográfico.

Otro parámetro de suma importancia en la programación, es ofrecer la característica de superponer las imágenes capturadas con un margen mínimo del 60% de superposición, esto para evitar pérdidas de datos al momento de crear el mapa aéreo. Para realizar el solapamiento de imágenes se debe considerar el tamaño de la imagen, la altura de vuelo, la velocidad de vuelo y el tiempo de obturación de la fotografía.

2.4. Configuración adicional para ejecución del algoritmo

Posterior a la programación efectuada, se configura la Raspberry Pi Zero W para que ejecute el algoritmo junto con el sistema operativo al energizar la tarjeta. Para ello se ingresa en la terminal de la tarjeta electrónica y se realiza lo siguiente:

- Se digita la línea de código para crear un documento y al final se coloca el nombre que se le dará, en este caso se llamará tesis.

```
sudo nano /etc/init.d/tesiscm
```

- Una vez dentro del documento creado se coloca el siguiente código.

```

1 case "$1" in
2 start)
3     echo "Iniciar Tesis"
4     /usr/bin/python/home/pi/Desktop/TesisF/tesis.py
5     ;;
6 stop)
7     echo "Detener Tesis"
8     ;;
9     *)
10        echo "Modo de uso: /etc/init.d/tesis {start|stop}"
11        exit 1
12        ;;
13    esac
14    exit 0

```

Figura 20. Programa para arrancar un script al iniciar Raspberry
Fuente: (SPAINLABS.COM, 2013)

En este algoritmo se debe especificar la ruta del programa que se desee ejecutar al arrancar el sistema operativo de la tarjeta.

- A continuación, se da la característica que el programa creado anteriormente sea ejecutable, para lo cual en la consola se digita lo siguiente:

```
sudo chmod 755 /etc/init.d/tesiscm
```

- Se comprueba que el algoritmo creado este correcto. Para esto se utiliza 2 líneas de código en la terminal para ejecutar el código y para detenerlo respectivamente.

```
sudo /etc/init.d/tesiscm start
```

```
sudo /etc/init.d/tesiscm stop
```

- Para que el programa se ejecute al iniciar el sistema operativo se digita en el terminal la línea de código siguiente.

sudo update-rc. d tesiscm defaults

De esta manera el programa creado para la captura de fotogramas, se iniciará automáticamente al energizar la tarjeta electrónica.

2.5. Diseño de la placa electrónica

Se elabora el diseño de un circuito electrónico el cual tiene la función de seleccionar el modo de trabajo del algoritmo implementado. Dicho circuito trabaja con lógica binaria, es decir da la opción de enviar un 1 o 0 lógico, donde en 1 el voltaje es de 5v y en 0 se tiene un voltaje de 0v. Al circuito se ha implementado 3 diodos led para verificar qué modo de trabajo se encuentra activo en el sistema de fotogrametría. En la Figura 21 se observa el esquema del circuito que se plantea implementar.

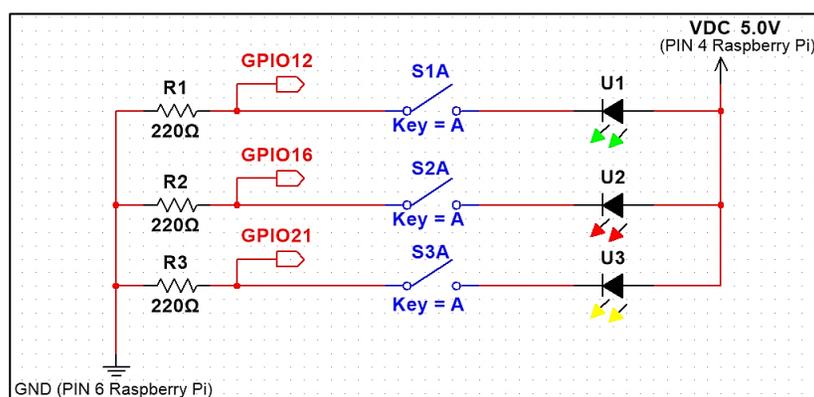


Figura 21. Esquema del circuito electrónico

El circuito cuenta 3 salidas que irán conectadas a la tarjeta RasGpberry Pi Zero W, la función que cumple cada salida del circuito es:

- La salida GPIO 12 sirve para apagar de manera segura la tarjeta electrónica.

- GPIO 16 permite elegir el modo de trabajo entre: 0 captura de frames o 1 grabación de video.
- El GPIO 21 se utiliza para detener la captura de fotogrametrías.

En el Anexo A2 se encuentra detallado la conexión y los materiales necesarios para la elaboración de la placa.

2.6. Acondicionamiento y ensamblaje del sistema.

El sistema previamente realizado será colocado en una carcasa diseñada en material PLA para impresión 3D, capaz de soportar temperaturas de hasta 75 grados centígrados. El diseño alberga de manera óptima todos los componentes del sistema, con lo cual se busca no ocupar mayor espacio. El tiempo de impresión del modelo fue aproximadamente 5 horas, las dimensiones de la carcasa son 6.1 cm de alto, 3.4 cm de ancho y 7.8 cm de largo. La elaboración de la carcasa fue llevada a cabo con el motivo de brindar una adaptación del sistema de fotogrametría aérea tanto para drones de ala fija como para multirrotores. En la Figura 22 se puede apreciar la vista frontal y posterior del objeto diseñado.

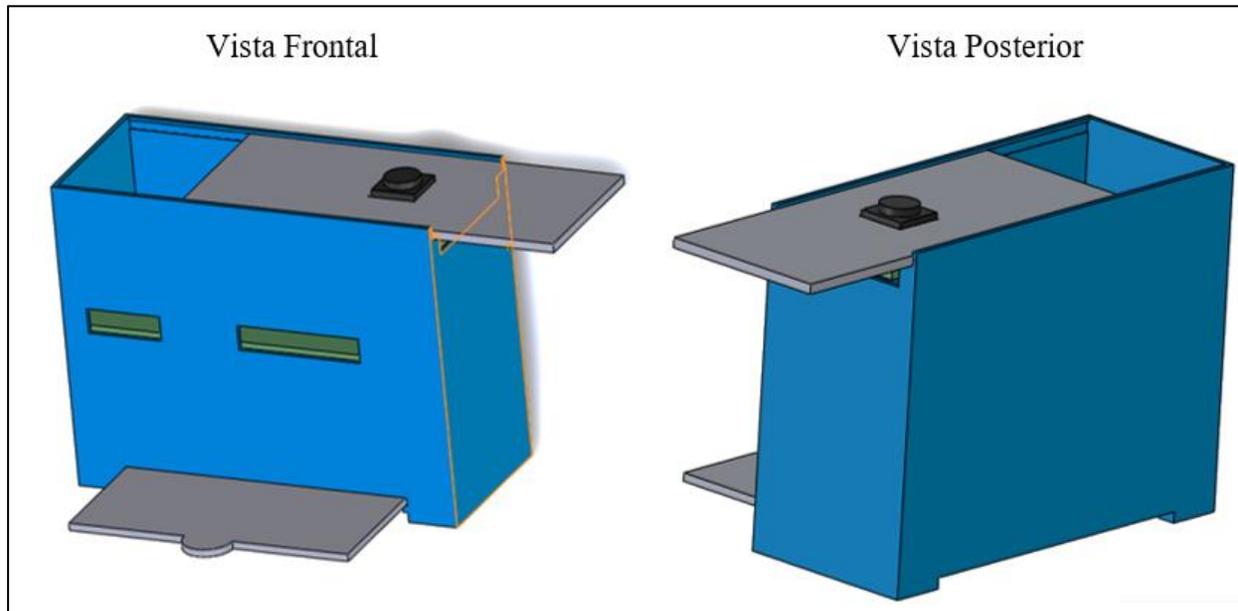


Figura 22. Vista frontal y posterior del diseño de la carcasa para el sistema de fotogrametría

El sistema se acondiciona de acuerdo a las medidas de los componentes y para posibles escenarios ambientales, se coloca un protector en spray para placas electrónicas, de esta manera se brinda mayor resistencia a la humedad y condiciones de temperaturas altas. Al terminar el ensamblaje del sistema de fotogrametría se obtiene un peso total de 68.5 gramos incluyendo una batería para autonomía propia de 380 mAh, el peso neto sin dicha batería es de 44.2 gramos, con lo cual el peso no excede a 1.1 libras, es decir 498.95 gramos peso máximo de carga que soporta el dron.

2.7. Pruebas de resolución de fotogramas y video

Posteriormente al unir la parte de Hardware y Software se obtiene como resultado un sistema de fotogrametría que posee un circuito electrónico capaz de controlar el funcionamiento del mismo. Dicho sistema captura fotogramas de manera autónoma por lo cual es necesario conocer la cantidad

de espacio requerido por cada archivo. Para determinar el tamaño total que ocuparán todos los archivos después de concluir la misión se establece la siguiente fórmula.

$$\text{Espacio requerido} = \text{Imágenes capturadas} \times \text{peso archivo resolución} \quad (9)$$

El espacio requerido varía de acuerdo a la resolución de la fotografía, donde a mayor resolución el área de captura del *frame* aumenta. El valor obtenido al aplicar la fórmula 9 sirve para determinar el tamaño de almacenamiento libre que debe poseer la tarjeta micro SD. Por lo tanto, de acuerdo a la resolución con la que se trabaje se tiene:

- Resolución HD son 1366 x 768 píxeles.



Figura 23. Imagen capturada con resolución de 1366 x 768 píxeles

El peso promedio del archivo es de 500 kB

Espacio requerido = Imagenes capturadas × peso archivo resolución

$$\text{Espacio requerido} = 1800 [\text{fotogramas}] \times \left[\frac{500 \text{ kB}}{\text{fotograma}} \right]$$

$$\text{Espacio requerido} = 900 [\text{MB}]$$

- Resolución de 720p o HD+ son 1280 x 720 píxeles.



Figura 24. Imagen capturada con resolución de 1280 x 720 píxeles

El peso promedio del archivo es de 1.3 MB.

Espacio requerido = Imagenes capturadas × peso archivo resolución

$$\text{Espacio requerido} = 1800 [\text{fotogramas}] \times \left[\frac{1.3 \text{ MB}}{\text{fotograma}} \right]$$

$$\text{Espacio requerido} = 2.34 [\text{GB}]$$

- Resolución de 1080p o Full HD son 1920 x 1080 píxeles.



Figura 25. Imagen capturada con resolución de 1920 x 1080 píxeles

El peso promedio del archivo es de 3 MB.

Espacio requerido = Imagenes capturadas × peso archivo resolución

$$Espacio\ requerido = 1800 [fotogramas] \times \left[\frac{3\ MB}{fotograma} \right]$$

$$Espacio\ requerido = 5.4\ [GB]$$

En las pruebas de video se obtuvo como resultado que un video de 5 minutos ocupa alrededor de 20 MB, por lo cual para una duración mayor simplemente se realiza el cálculo del tamaño del archivo aplicando una regla de tres.

2.8. Pruebas de funcionamiento

Todos los vuelos para pruebas de funcionamiento fueron efectuados en las instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Para la primer prueba se empleó un dron tipo cuadricóptero, ya que estos no poseen una velocidad crucero por lo cual sus movimientos son más variados. De tal manera se espera ver cómo se comporta el sistema de fotogrametría en condiciones de movimiento variado. Estas pruebas son realizadas para establecer si los *frames* capturados se distorsionan o presentan algún inconveniente. Como resultado se verificó que las imágenes capturadas hasta una altura de 30 metros no presentan distorsión, por lo cual se procede a realizar las pruebas de funcionamiento en el dron de ala fija.

En la segunda etapa de pruebas se empleó el dron de ala fija, donde se coloca el sistema de fotogrametría de forma perpendicular apuntado al piso. El operador autorizado para manejar el dron, ingresa en el sistema de vuelo la trayectoria que se seguirá, en la Figura 26 se puede ver dicha trayectoria.

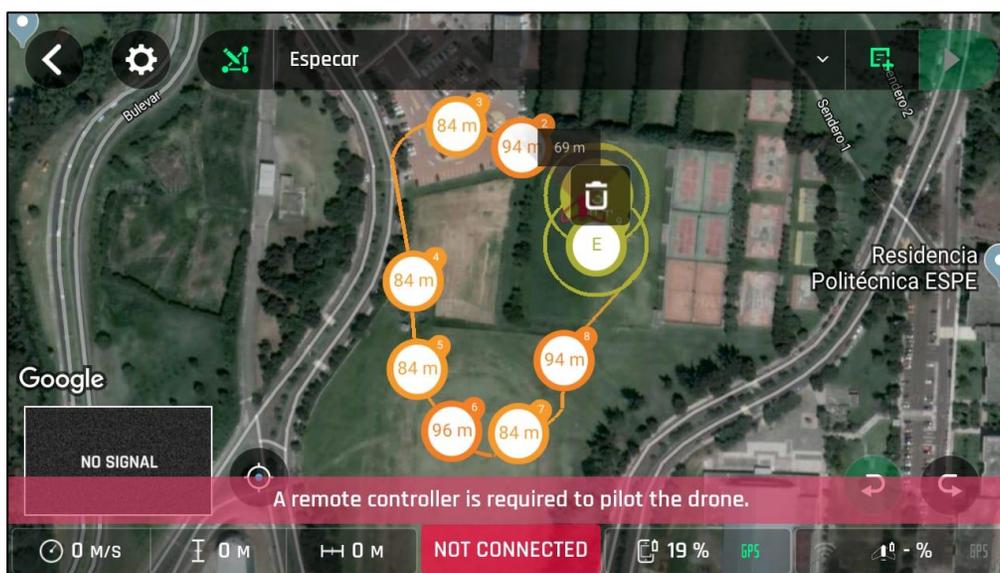


Figura 26. Sistema con la trayectoria de vuelo del dron de ala fija

Para determinar el valor de distancia de muestreo en tierra se reemplazan los datos propios del sensor, así como del vuelo del dron presentados en la Tabla 6 en las ecuaciones 1 y 2.

Tabla 6

Características del sensor de imagen empleado y del vuelo del dron.

Altura de vuelo	80 m
Altura del sensor	2,76 mm
Ancho del sensor	3,68 mm
Distancia Focal	3,04 mm
Altura de la imagen	1080 píxel
Ancho de la imagen	1920 píxel

$$GSD_{\text{Altura}} = \frac{\text{Altura de vuelo} \times \text{Altura del sensor}}{\text{Distancia Focal} \times \text{Altura de la imagen}}$$

$$GSD_{\text{Altura}} = \frac{80 \text{ m} \times 2,76 \text{ mm}}{3,04 \text{ mm} \times 1080 \text{ píxel}} = \frac{8000 \text{ cm} \times 0,276 \text{ cm}}{0,304 \text{ cm} \times 1080 \text{ píxel}}$$

$$GSD_{\text{Altura}} = 6,72 \frac{\text{cm}}{\text{píxel}}$$

$$GSD_{\text{Ancho}} = \frac{\text{Altura de vuelo} \times \text{Ancho del sensor}}{\text{Distancia Focal} \times \text{Ancho de la imagen}}$$

$$GSD_{\text{Ancho}} = \frac{80 \text{ m} \times 3,68 \text{ mm}}{3,04 \text{ mm} \times 1920 \text{ píxel}} = \frac{8000 \text{ cm} \times 0,368 \text{ cm}}{0,304 \text{ cm} \times 1920 \text{ píxel}}$$

$$GSD_{\text{Ancho}} = 5,04 \frac{\text{cm}}{\text{píxel}}$$

Se considera el valor de 6.72 cm/píxel para determinar la distancia de muestreo en tierra. Lo que significa que cada píxel de la fotogrametría representa a 6.72 cm lineales de tierra, es decir un área de 45.16 cm². De acuerdo a la altura de vuelo el área que captura cada frame variará, para las pruebas realizadas a una altura de 80 metros se tiene:

$$\text{Ancho} = \text{Píxeles}_{\text{Ancho}} \times \text{GSD}_{\text{Ancho}} \quad (10)$$

$$\text{Ancho} = 1920 \text{ píxel} \times 5,04 \frac{\text{cm}}{\text{píxel}}$$

$$\text{Ancho} = 9676.8 \text{ cm} = 96,76 \text{ m}$$

$$\text{Alto} = \text{Píxeles}_{\text{Alto}} \times \text{GSD}_{\text{Alto}} \quad (11)$$

$$\text{Alto} = 1080 \text{ píxel} \times 6,72 \frac{\text{cm}}{\text{píxel}}$$

$$\text{Alto} = 7257,6 \text{ cm} = 72,57 \text{ m}$$

$$\text{Área capturada} = \text{Ancho} \times \text{Alto} \quad (12)$$

$$\text{Área capturada} = 96,76 \text{ m} \times 72,57 \text{ m}$$

$$\text{Área capturada} = 7021 \text{ m}^2$$

Para demostrar que se cumple la superposición requerida de al menos 60% para cada imagen, se toma en cuenta el tiempo de obturación, velocidad de crucero del dron y la posición del sensor de imagen donde la dirección del frame será paralela a la dirección de vuelo. Es decir, tomando en cuenta un escenario de pruebas controlado sin interferencias externas, donde existe un movimiento lineal del dron. Con una velocidad del dron de 12 m/s y un tiempo de obturación de 1 segundo, al volar de acuerdo a la dirección escogida se tiene:

Tabla 7

Superposición esperada en cada frame de acuerdo al ancho o alto.

Ancho	Alto
96,76 m → 100% Del frame	72,57 m → 100% Del frame
12 m → X	12 m → X
Área del frame: 12,40 %	Área del frame: 16,54 %
Superposición: 87,6 %	Superposición: 83,46 %

Como resultado de las fotogrametrías se pudo apreciar que cada una de ellas captura un área de 7021 m², esta área puede variar debido a interferencias externas como puede ser una ráfaga de viento lo que causa que el dron pierda o aumente altitud. Por este motivo los frames capturados se pueden superponer hasta en un 87% de acuerdo a la dirección de vuelo evitando pérdida de datos. Además, las 324 fotografías obtenidas no se distorsionan ni presentan desperfectos en su captura y almacenamiento. Los ejemplos de las fotogrametrías capturadas se pueden ver en las figuras 27 y 29, mientras que para demostrar que el área capturada concuerda con los valores obtenidos se utiliza la herramienta Google Maps, donde el área capturada en cada frame es similar a los 7021m² calculados, esto se puede ver en las figuras 28 y 30.

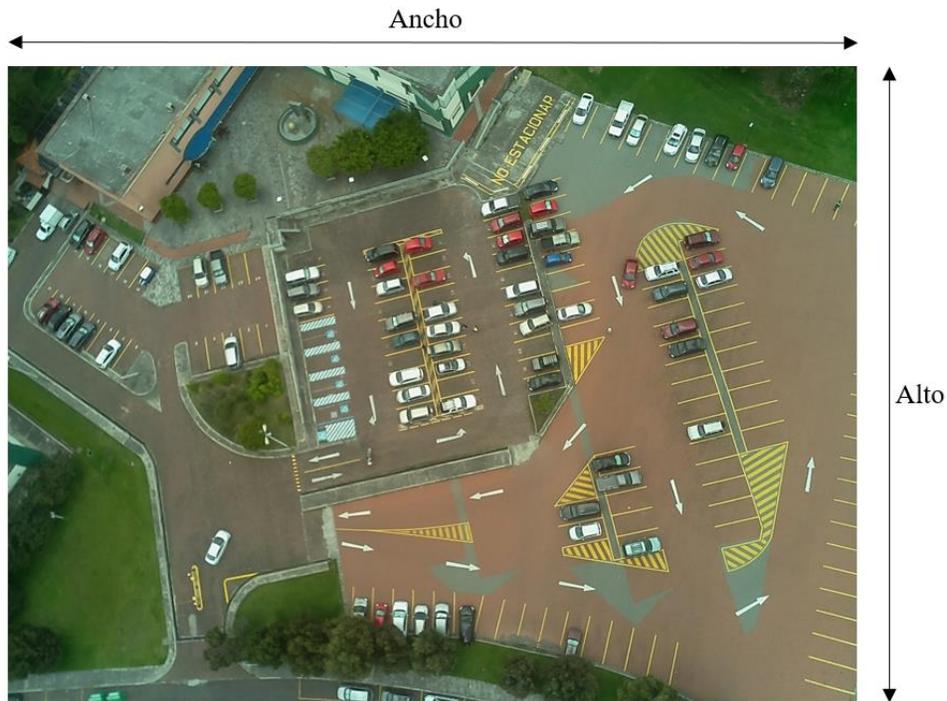


Figura 27. Ejemplo 1 de la captura aérea de la zona de pruebas



Figura 28. Captura de Google Maps área de 7018,63 m²
 Fuente: (Google, 2019)



Figura 29. Ejemplo 2 de la captura aérea de la zona de pruebas



Figura 30. Captura de Google Maps área de 7020.86 m²
Fuente: (Google, 2019)

CAPÍTULO III

MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL DRON

Mejorar la eficiencia energética del dron es de carácter esencial para el proyecto puesto que con ello se busca aumentar la autonomía de vuelo. Para optimizar el consumo energético por parte de los elementos que demandan energía, es necesario sensar y dividir a todos los dispositivos que conforman el dron por módulos, con lo cual se determina la energía que requiere cada módulo para su funcionamiento.

Posteriormente aplicando la estimación basada en la intensidad, también conocida como el medidor amperios-hora (A/h) de Coulomb, se implementa una técnica de control basada en reglas. El sistema de control actuará sobre los módulos que comprende el dron de acuerdo al porcentaje del SOC de la batería, dichos módulos se irán desactivando según la importancia que se le ha dado a cada uno de ellos. El controlador de vuelo y el motor son los únicos elementos que no serán controlados por tratarse de un dron aéreo, donde desactivar el motor puede llevar a una colisión inminente.

3.1. Requerimientos

La batería que se utilizará en el dron será de tipo Li-Po esto debido a que frente a una batería Li-Ion cuenta con mejores prestaciones, como es: un tiempo de carga menor, flexibilidad de adaptación para conexión y mayor cantidad de almacenamiento en menor tamaño. Donde el peso de una batería de 8000 mAh Li-Po pesa alrededor de 500 gramos mientras que una de tipo Li-Ion aproximadamente pesa 1100 gramos. La batería seleccionada energizará al dron y será monitoreada junto con las cargas, para aplicar el control basado en reglas de acuerdo al estado de carga de la batería.

El sistema de control busca mejorar la eficiencia energética de la batería de 7.4 voltios de 4 celdas con capacidad de almacenamiento de 8000 mAh, dicho sistema debe estar conformado por componentes que no ocupen gran tamaño físicamente para evitar aumentar un peso considerable al dron. El sistema comprende un sensor de corriente de efecto Hall ACS712 y un controlador Arduino nano donde se realizará el algoritmo de control el cual gobernará toda la energía que consume cada componente del dron. Dicho controlador se rige al porcentaje del estado de carga de la batería y de acuerdo al mismo, envía respuestas con un retraso en el orden de los milisegundos hacia los distintos módulos.

Se evalúa al dron para determinar los dispositivos que comprende y de esta manera se va a ir subdividiendo al dron en módulos. Se ha subdividido al dron en 4 módulos, según su grado de importancia se los ha clasificado de menor a mayor de la siguiente manera:

- Módulo de sensores. - comprende los sensores de temperatura, humedad, altura, velocidad y presión.
- Módulo de fotogrametría. - aquí se encuentra presente el sistema electrónico desarrollado en este trabajo de titulación.
- Módulo de geolocalización. - en donde se encuentra el sistema de posicionamiento global más conocido como GPS (siglas del inglés *Global Positioning System*) del dron.
- Módulo de potencia. - donde se encuentra el motor del dron y el sistema que lo controla, los cuales serán los únicos componentes que no se desactivarán con la técnica de control aplicada.

3.2. Delimitación de reglas para la estrategia de control

El algoritmo de control que se pretende implementar en el controlador, obedece reglas de acuerdo al estado de carga (SOC) de la batería. Según el SOC que presente la batería se irán desactivando los diferentes módulos que comprende el dron, de acuerdo a la importancia que estos brinden para el vuelo y aterrizaje seguro del dron. Las reglas que gobernarán el sistema de control son las siguientes:

- Regla 1

Quando el SOC de la batería se encuentre en un porcentaje menor al 30% se pretende desactivar el módulo de sensores, la variable con la cual se nombra al módulo es MS.

- Regla 2

A partir del 20% del SOC se desactiva el módulo de fotogrametría, nombrado con la variable MF.

- Regla 3

Esta regla trabaja en el valor del 10% del porcentaje del SOC, desactivando el módulo de geolocalización llamado MG.

El módulo de geolocalización es el último en desactivarse debido a que en una próxima etapa del proyecto se pretende implementar una señal de auxilio. Esto quiere decir que antes de apagar el módulo, se procede a enviar el sistema de referencia de coordenadas geográficas, haciendo uso de las coordenadas angulares, latitud y longitud. Con lo cual, si llegase a presentarse el caso de extravío del dron, se podrá determinar la última ubicación para así delimitar un área de búsqueda. En el diagrama de flujo de la Figura 31 se presenta el algoritmo de control que se pretende implementar.

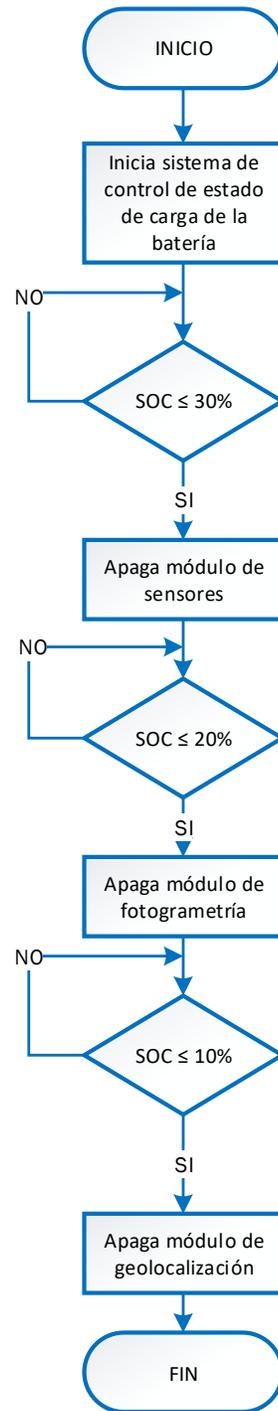


Figura 31. Diagrama de flujo del algoritmo a implementar para el control de acuerdo al estado de carga de la batería

3.3. Desarrollo del algoritmo de control para el estado de carga.

Al realizar el algoritmo de control es importante tener en cuenta la sensibilidad del sensor de corriente. Se parte de la Figura 14 donde se asigna a cada cantidad de corriente un valor proporcional en voltaje donde se puede observar que para el valor de 2,5 V se tiene una corriente de 0 A. De esta manera se tiene una relación lineal con la cual se puede aplicar la ecuación 6, donde se tienen dos valores constantes el valor de 2,5 V y el valor de la sensibilidad, dichos valores son dados por la hoja de especificaciones técnicas del sensor de corriente.

Donde m viene a ser la sensibilidad del sensor de corriente. A partir de esta ecuación se procede a despejar la corriente para determinar la cantidad de intensidad que las cargas están ocupando, entonces la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$I = \frac{V - 2,5}{\text{sensibilidad}} \quad (13)$$

Para las lecturas que va a realizar el sensor de corriente, es necesario realizar un filtro de los datos basados en la media aritmética. Esto quiere decir que a partir de lecturas que lleguen hacia el controlador estas se sumarán y se dividirán para un número de muestras determinado. El número de muestras se coloca de acuerdo a el nivel de ruido que se tenga, existe la relación que a mayor número de muestras será mejor el resultado, pero al controlador le tomará más tiempo en realizar la medición, motivo por lo cual no se debe poner un número muy alto de muestras, en este caso se tomarán 300 muestras.

Hay que tener en cuenta que los valores dados por la hoja de especificaciones técnicas del sensor no son valores reales, por esta razón se evalúa al sensor para así obtener los valores reales en la aplicación. Para ello se emplea un amperímetro y un multímetro, instrumentos con los cuales se

comparan los valores medidos frente a los valores que se obtuvieron con el sensor. A continuación, se realiza una medición sin carga (0 A) donde el valor del voltaje debería ser de 2,5 V, dicha prueba en el multímetro muestra un valor de 2,66 V para 0 A.

Lo siguiente es colocar una carga mayor a un amperio y medir con el sensor de corriente, obteniendo un valor de 1,21 A. Con estos valores se puede recalculer la sensibilidad del sensor aplicando la ecuación de la pendiente y reemplazando por los valores obtenidos al realizar las mediciones con el sensor, el amperímetro y multímetro.

$$m = \frac{V_1 - V_0}{I_1 - I_0} \quad (14)$$

$$sensibilidad = \frac{2,66 - 2,5}{1,21 - 0} = 0,132 \frac{V}{A}$$

Al obtener los valores reales de trabajo se procede a ingresar dichos valores en el algoritmo elaborado para que las lecturas del sensor tengan un menor porcentaje de error al momento de captar la corriente que consumen las cargas.

El porcentaje de error que se obtiene en las medidas realizadas con el sensor de corriente frente al multímetro es de 2,16%. Aceptando el porcentaje de error se procede a implementar la ecuación 5 en el algoritmo de control para determinar el porcentaje de estado de carga (SOC), reemplazando por los datos obtenidos, la ecuación a implementar es la siguiente.

$$SOC = SOC_0 - \frac{0,991}{8000mAh} \times \int_0^t I(t) \times dt \quad (15)$$

3.4. Pruebas ejecutadas y resultados obtenidos.

Debido a que el trabajo de investigación se efectúa como una parte de un proyecto macro, actualmente se cuenta con el módulo de fotogrametría. Para realizar las pruebas del SOC, se simulan las cargas que comprende cada uno de los módulos del dron, de esta manera el consumo estimado de corriente de cada módulo se encuentra detallado en la Tabla 8.

Tabla 8

Consumo de corriente y tiempo de duración de cada módulo por separado.

Módulos	Consumo de Corriente	Horas de funcionamiento para batería de 8000 mAh
Módulo de sensores	1550 mA	5,16 h
Módulo de fotogrametría	320 mA	25 h
Módulo de geolocalización	1500 mA	5,33 h
Módulo de potencia	5500 mA	1,45 h
Todos activos	8870 mA	0,90 h

Originalmente el fabricante del dron estima un tiempo de vuelo de 85 minutos, este tiempo de vuelo ha disminuido debido a las cargas extras que serán colocadas en el dron. Tomando en cuenta la cantidad de energía que la batería almacena (8000 mAh) y la corriente total (8870 mA) que ocupan los equipos se obtiene un nuevo tiempo estimado de 54 minutos de vuelo.

Para la ejecución de las pruebas primero se mide el valor de la corriente sin conectar cargas, es decir únicamente con el sensor de corriente, teniendo como resultado 30,32 mA, posteriormente se conectan todas las cargas en conjunto hacia la fuente de voltaje para medir el consumo de corriente total, obteniendo un valor de 8528,76 mA.

Al efectuar las pruebas se puede constatar el funcionamiento de las reglas de control, es decir dependiendo del porcentaje del SOC, se habilitarán las salidas digitales establecidas en el controlador. Dichas salidas son las encargadas de enviar el valor de 1 lógico lo cual desactiva los diferentes módulos del dron. Dentro del módulo de fotogrametría, en su controlador se ha establecido un pin de entrada el cual al ser activado en alto procede a apagarse. De esta manera se garantiza un aumento en la autonomía de vuelo del dron. En la Figura 32 se observa cómo trabaja el sistema mientras una carga va consumiendo energía, el porcentaje del SOC irá disminuyendo de acuerdo a la cantidad de energía restante en la batería, a su vez mientras más cargas se desconecten de la fuente principal de energía la autonomía aumentará.

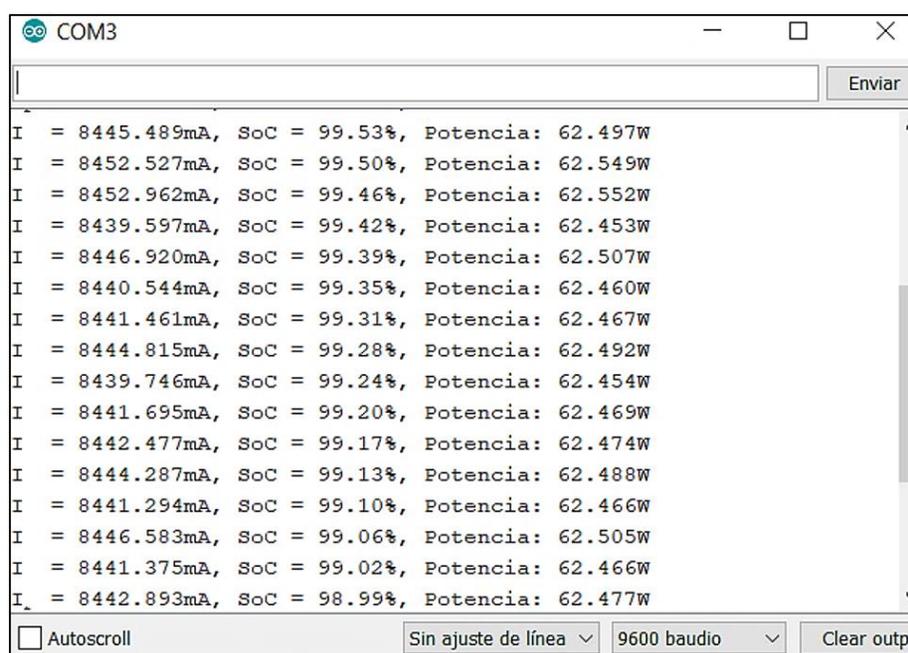


Figura 32. Prueba efectuada trabajando con todas las cargas conectadas

Al estar activos todos los módulos que conforman el dron se consume una corriente de aproximadamente 8500 mA y una potencia de 63 W. El porcentaje del SOC disminuye a una velocidad media de 0,05% por segundo.

A continuación, se efectúan pruebas de funcionamiento con el algoritmo de control implementado, con lo cual se obtienen los siguientes resultados para cada regla de control.

- Regla 1

Al llegar el SOC a un valor del 30% ejecuta la regla de control número 1, con lo cual se obtuvo una disminución de consumo de corriente cercana a los 1524 mA. De igual forma la potencia disminuye a un promedio de 55,3 W y la velocidad promedio con la que el SOC disminuye es de 0,03% por segundo. En la Figura 33 se puede constatar el funcionamiento de la regla de control 1.

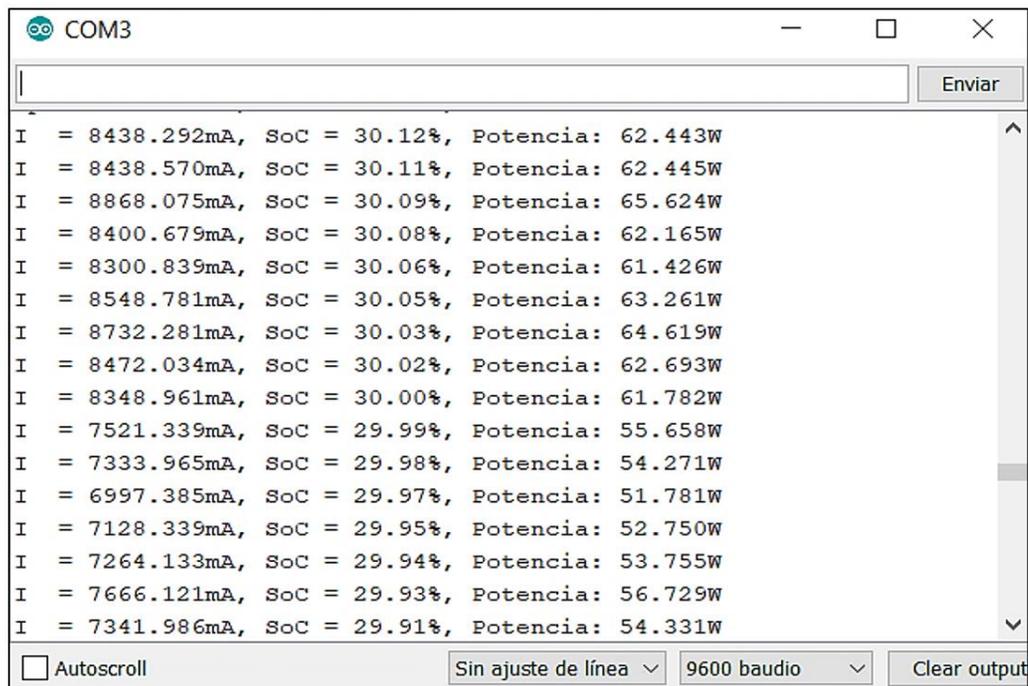


Figura 33. Funcionamiento de la regla de control 1

- Regla 2

La regla de control 2 se activa cuando el porcentaje de SOC se encuentra al 20% y se obtiene la disminución de 320 mA del consumo de corriente. La potencia llega a un valor de 48,8 W y la velocidad de descarga del SOC es de 0,02%, estos datos se pueden verificar en la Figura 34.

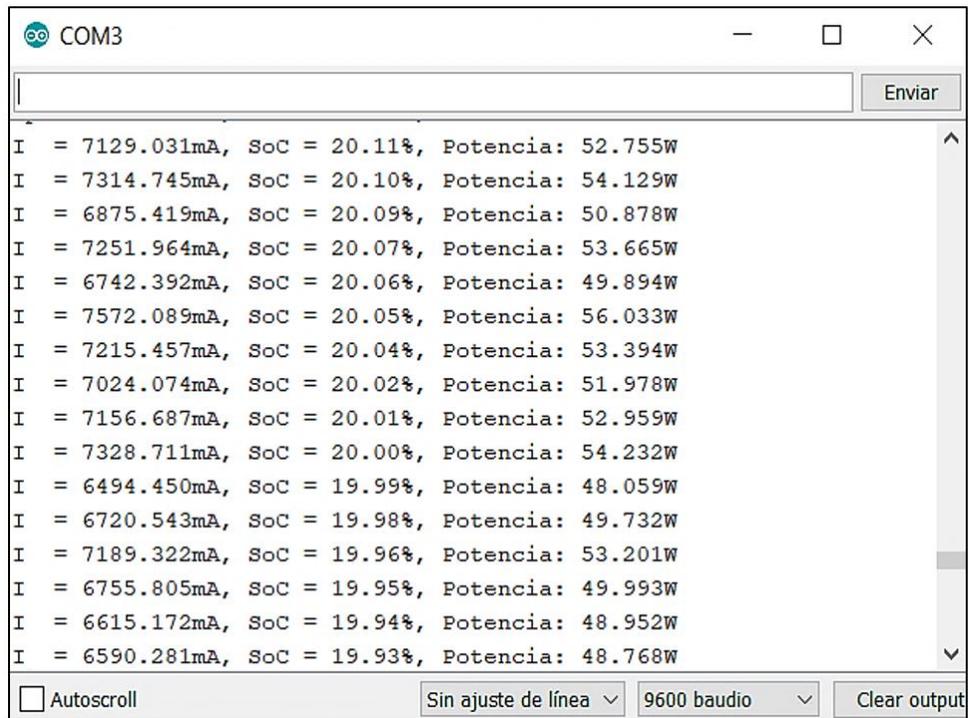


Figura 34. Funcionamiento de la regla de control 2

- Regla 3

Al llegar el SOC al 10% la regla de control 3 se activa, con esto la corriente que consume el dron disminuye 1500 mA, lo cual lleva a un consumo de corriente de aproximadamente 4750 mA con una potencia de 35,4 W. La velocidad de descarga del SOC es de 0,01% por segundo.

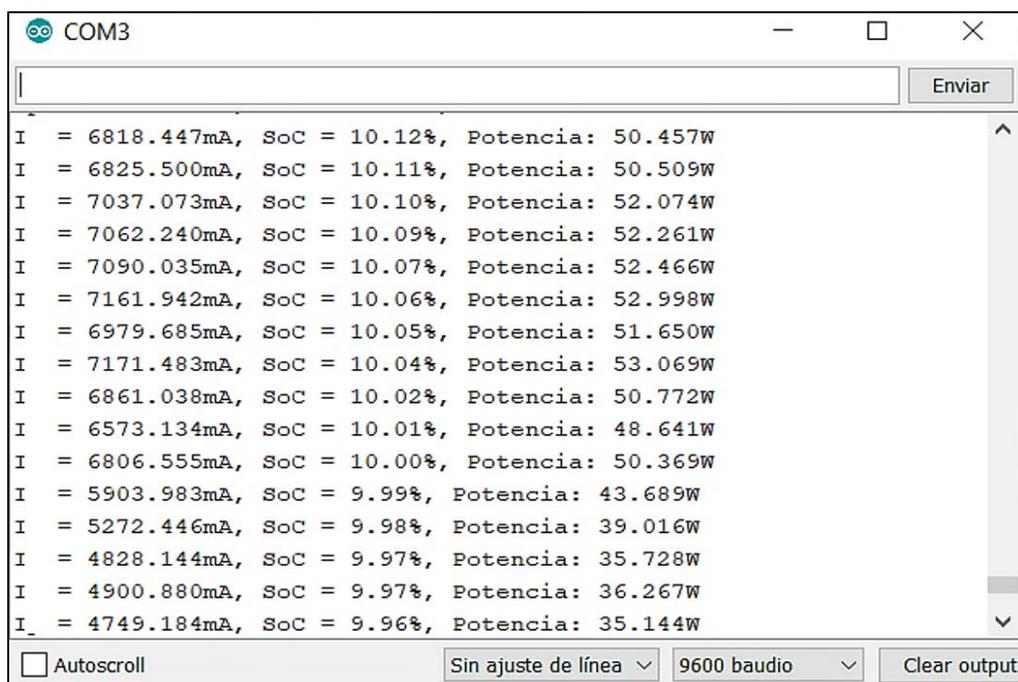


Figura 35. Funcionamiento de la regla de control 3

Mediante las pruebas realizadas se han recolectado datos de la medición tomada por el sensor de corriente para determinar el verdadero tiempo de autonomía que presentará el dron de acuerdo a los módulos activos. En la Tabla 9 se aprecian los valores reales obtenidos en la medición y el tiempo de autonomía de vuelo que se espera al estar activo cada módulo después de aplicar las reglas de control.

Tabla 9

Valores procedentes de las pruebas de consumo de corriente.

Módulos	Consumo de Corriente	Horas de funcionamiento para batería de 8000 mAh	Activación de acuerdo al porcentaje del SOC	Cantidad restante de energía en la batería
Módulo de sensores	1523,60 mA	5,25 h	30%	2400 mAh
Módulo de fotogrametría	313,46 mA	25,52 h	20%	1600 mAh
Módulo de geolocalización	1412,04 mA	5,29 h	10%	800 mAh
Módulo de potencia	5276,92 mA	1,46 h	—	—
Todos activados	8526,02 mA	0,94 h	—	—

A partir de los datos obtenidos se realiza una comparación del consumo de intensidad antes y después de aplicar la estrategia de control, dicha comparación se puede ver en la tabla 10.

Tabla 10

Comparación del consumo de intensidad antes y después de aplicar la estrategia de control.

Comparación del consumo de intensidad					
Porcentaje de carga en la batería	Capacidad disponible en la batería (mAh)	Sin controlador		Control basado en reglas	
		Consumo de intensidad (mA)	Tiempo (min)	Consumo de intensidad (mA)	Tiempo (min)
100%	8000	8526,02	56,30	8526,02	56,30
30%	2400	8526,02	16,89	7002,42	20,56
20%	1600	8526,02	11,26	6688,96	14,35
10%	800	8526,02	5,63	5276,92	9,10

Con los valores de la tabla 10 se realiza la Figura 36 con lo cual se demostró que se tiene un tiempo de aproximadamente 36 minutos de vuelo donde están activos todos los módulos del dron

y 60,1 minutos de vuelo total, por lo cual se obtienen resultados positivos con la técnica de control basada en reglas que ayuda a disminuir el consumo de energía, brindando de esta manera un aterrizaje seguro del dron y una autonomía de vuelo de 3,8 minutos más respecto a antes de aplicar la técnica de control. Además, la autonomía del dron puede aumentar de acuerdo a la misión que realice, es decir en un escenario hipotético se puede descartar el uso del módulo de sensores aumentando significativamente la autonomía del dron hasta 15 minutos más.

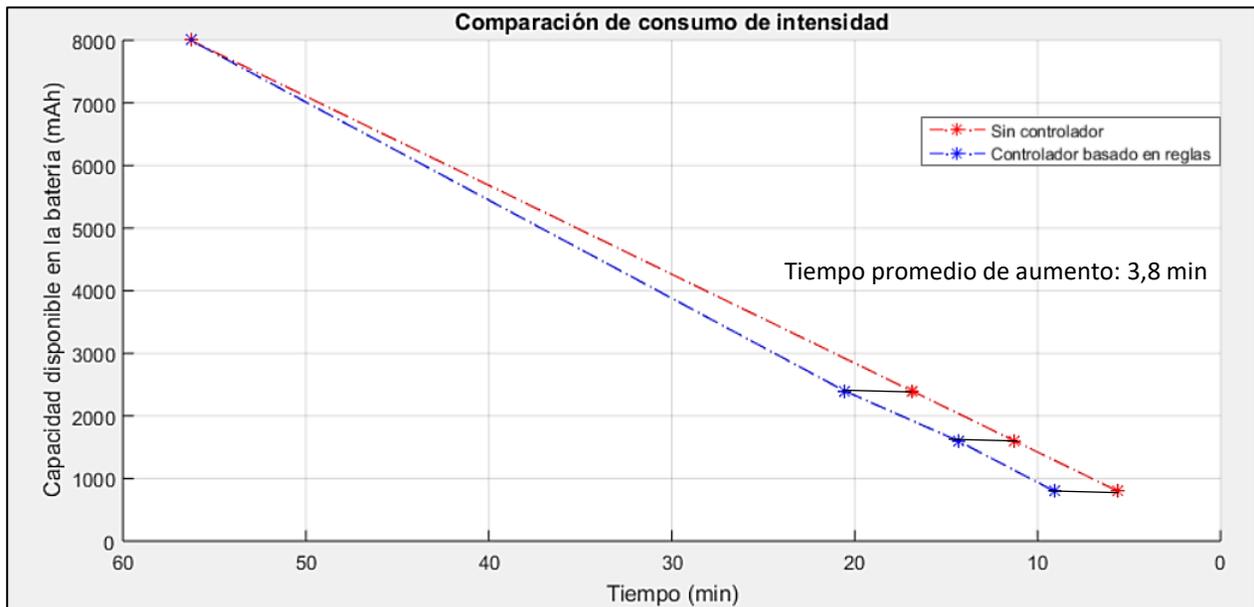


Figura 36. Comparación del consumo de intensidad después de aplicar la estrategia de control

CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

En la elaboración del sistema de fotogrametría se realizó una comparación y análisis de los sensores de imagen y controladores, para determinar los componentes que se acoplan de mejor manera para la aplicación de fotogrametría aérea, los componentes seleccionados fueron: controlador Raspberry Pi Zero W y sensor de imagen CMOS Sony IMX219PQ.

El diseño del circuito electrónico que gobierna la tarjeta electrónica Raspberry Pi Zero W trabaja con un voltaje de alimentación de hasta 5 voltios, para su elaboración se consideraron el tamaño y peso, para que estos no influyan en el peso final del dron. El sistema de fotogrametría opera con una corriente de 320 mA, por lo que, no influirá de manera significativa en la autonomía de vuelo. El algoritmo que gobierna el sistema de fotogrametría se ejecuta automáticamente al energizar la tarjeta de control y puede detenerse de manera manual al concluir la misión o de manera automática de acuerdo al estado de carga que presente la batería mediante el control basado en reglas. En dicho algoritmo se puede modificar parámetros como: nivel de brillo, sensibilidad ISO, velocidad de obturación y contraste, de manera manual o automática mediante líneas de código.

Al efectuar las pruebas de funcionamiento se calibro el sistema de fotogrametría con una resolución full HD es decir 1920 x 1080 píxeles, el tiempo de obturación es de 1 segundo, la sensibilidad ISO tiene un valor de 100 y el nivel de brillo es de 50. Adicionalmente se colocó el sistema electrónico en el dron de ala fija de manera que el sensor de imagen quede en dirección ortogonal al suelo. Con las pruebas de funcionamiento realizadas se pudo comprobar que las fotogrametrías capturadas cumplen con las especificaciones requeridas como son: resolución

mínima y control de obturación, con el fin de obtener fotogramas de buena calidad, los cuales permitirán obtener la información para registrar los niveles de saturación hídrica del suelo. Mediante el uso de la herramienta Google Maps, se pudo demostrar que, los cálculos del área que captura cada frame a partir del GSD a una elevación de 80 metros son correctos capturando $7\,021\text{ m}^2$ por frame.

El costo del sistema de fotogrametría implementado es alrededor de 90 dólares, mientras que un sistema profesional destinado a realizar la misma función se encuentra desde 400 dólares. Además, gracias a los cálculos obtenidos de la distancia de muestreo en la tierra, se pudo concluir que el sistema supera la superposición del 60 %, requisito mínimo para realizar fotogrametrías aéreas.

Se implementó un control basado en reglas en una tarjeta electrónica Arduino Nano, donde a partir del 30 % del SOC de la batería, el control actúa sobre cada módulo del dron, de esta manera, la autonomía de vuelo pudo aumentar aproximadamente 4 minutos más. El sensor de corriente de efecto Hall ACS712 toma 300 muestras, con lo cual, el controlador tarda un tiempo aproximado de 50 milisegundos en efectuar la medición. Al utilizar baterías de clase secundaria y tipo Li-Po se espera que después de 30 ciclos completos de carga y descarga, esta comienza a desgastarse, es decir, la descarga de la batería es más rápida por lo que la autonomía de vuelo disminuirá.

Las pruebas realizadas en el laboratorio simulando los diferentes módulos del dron, arrojaron resultados positivos de funcionamiento. Al efectuar las pruebas de campo con el dron, se realizó la conexión del módulo de fotogrametría con el controlador Arduino Nano y el resultado obtenido fue satisfactorio, ya que al llegar el SOC de la batería a un valor del 20 % el módulo de fotogrametría se desactivó.

4.2. Recomendaciones

La tarjeta electrónica Raspberry Pi Zero W, se encuentra trabajando en modo gráfico consumiendo una corriente total de 320 mA, la cual puede ser disminuida al trabajar en modo consola, donde únicamente se emplean líneas de comandos. Trabajar en este modo puede ser una buena opción para capturar las fotogrametrías, debido a que el costo computacional y consumo de corriente disminuiría significativamente. El inconveniente que presenta es que los frames capturados no pueden ser visualizados directamente al conectar la Raspberry, por lo cual se debería utilizar otro software. Por ello, para todo proyecto donde se necesite visualización de imágenes o videos es recomendable trabajar en modo gráfico.

El mini computador Raspberry Pi Zero W ofrece escalabilidad dentro del proyecto, debido a que cuenta con entradas y salidas digitales, Wifi, Bluetooth y un puerto de comunicación serial. La desventaja que presenta la tarjeta electrónica, es que no cuenta con entradas o salidas analógicas por lo cual, si se desea trabajar con dichas señales se recomienda utilizar un módulo Arduino y realizar una comunicación vía serial.

Para fotogrametría aérea no es necesario transmitir video en tiempo real, pero de existir la necesidad, se puede trabajar con el protocolo de comunicación de cubierta segura (SSH, sus siglas del inglés *Secure SHell*) lo que permite transmitir video en tiempo real vía Wifi hacia dispositivos que cuenten con un software para recepción de video como: computadoras, tabletas digitales y teléfonos inteligentes.

La autonomía de vuelo depende de los sensores que se encuentren conectados y del peso de los mismos, por esto, si en un vuelo no es necesario utilizar algún módulo del dron, se lo debe desconectar y desmontar. Es necesario que todos los componentes extras que se coloquen,

presenten la característica de ser desmontables. Además, cada componente que se instale, se debe acoplar de tal manera que no influya en el diseño aerodinámico del UAV.

En el algoritmo del sistema de fotogrametría, se puede implementar la función para realizar procesamiento de imágenes en tiempo real, no se consideró esta opción, debido a que el costo computacional y el consumo de energía aumentaría, teniendo como consecuencia posibles fallas en el sistema como la pérdida de frames. El procesamiento de imágenes se lo puede realizar en el modo gráfico de Raspberry Pi, pero debido a que este es un mini computador que cuenta con 512 MB de memoria RAM y una velocidad de CPU de 1GHz, es preferible ejecutar el procesamiento de imágenes en un computador con mejores prestaciones.

El sensor de corriente de efecto Hall ACS712 en su datasheet indica una sensibilidad de 66 mA, mientras que en la práctica, se pudo determinar que el sensor no detecta corrientes menores a 50 mA, ya que, un consumo de corriente bajo los 50 mA no es de carácter crítico y al contar con un error de 2,16 % en las mediciones realizadas, el sensor seleccionado es aceptado. Si se desea disminuir el error en las mediciones, es aconsejable reprogramar parcialmente el algoritmo de control, elaborar un circuito de instrumentación o reemplazar por otro sensor de corriente.

BIBLIOGRAFÍA

- Addati, G. A., & Pérez Lance, G. (2014). Introducción a los UAV's, Drones o VANT's de uso civil. *ECONSTOR*.
- Allegro MicroSystems, I. (2019). *ACS712 Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*. Massachusetts: Copyright ©2006, 2007, Allegro MicroSystems, Inc.
- Axis, C. (2018). *Camera elements*. Lund: Axis Communications AB.
- Betancur, M. (2016). *Aplicación a las baterías de li-po en el vehículo solar del semillero de investigación en energías renovables*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Buchmann, I. (2017). *BU-808c: Coulombic and Energy Efficiency with the Battery*. Cadex Electronics Inc. .
- CEPRA, E. P. (2018). *Pyoyectos de investigación Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Mecánica*. Quito.
- Chang, W. (2013). The State of Charge Estimating Methods for Battery: A Review. *Hindawi Publishing Corporation*, 1-2.
- ElectroniLab. (23 de Noviembre de 2018). *ELECTRONILAB Ingeniería y Diseño Electrónico*. Obtenido de <https://electronilab.co/tienda/camara-para-raspberry-pi-5mp/>
- EVENT 38, U. S. (25 de Septiembre de 2018). *EVENT 38 UNMANNED SYSTEMS*. Obtenido de <https://event38.com/product/e386-complete-package/>
- Fernández Lozano, J., & Gutiérrez Alonso, G. (2016). Geological applications of UAVs. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 89-105.
- García Fernández, E. (2015). *Planificación de vuelos fotogramétricos para U.A.V.*
- Giner Bellot, F. J. (2018). *Diseño y Construcción de un Vehículo Aéreo no Tripulado Autónomo*. Valencia: Universitat Politècnica de València. Departamento de Informática de Sistemas y Computadores .
- Google. (26 de Marzo de 2019). *Google Maps*. Obtenido de Mapa de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador: <https://www.google.com/maps/@-0.314906,-78.4458209,225a,35y,90h/data=!3m1!1e3?hl=es-ES>
- Jones, D. (2018). *Picamera*. © Copyright 2013-2018 Dave Jones Revision 93a0808b.
- Márquez Díaz, J. E. (2018). Metropolitan security through the coordinated use of Drones. *Ingenierías USBMed*, 39-48.
- MicroRobotics. (27 de Noviembre de 2018). *Micro Robotics Org*. Obtenido de <https://www.robotics.org.za/TEENSY3.6>

- Naylamp, M. (23 de Noviembre de 2018). *Naylamp Mechathronics*. Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/sensores-luz-y-sonido/140-modulo-camara-vga-ov7670.html>
- Ordóñez, J. F., & Oñate, L. (2016). *Edge detection image using arm*. Quito: INGENIUS Revista de Ciencia y Tecnología.
- PiHut. (11 de Noviembre de 2018). *The PiHut*. Obtenido de <https://thepihut.com/products/raspberry-pi-zero?src=raspberrypi>
- Pix4D. (15 de Marzo de 2019). *Pix4D*. Obtenido de © 2011-2019 Pix4D. : <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558849>
- Propeller. (15 de Marzo de 2019). *Propeller Aero*. Obtenido de Propeller Aerobotics Pty Ltd: <https://www.propelleraero.com/blog/ground-sample-distance-gsd-calculate-drone-data/>
- Ramos Gálvez, J. (2017). *Aplicación para la toma de datos de contexto para un UAV basado en Raspberry y ArduPilot*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- RaspberryPi. (22 de Noviembre de 2018). *RaspberryPi Org*. Obtenido de <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-zero/>
- Réflex. (2018). *Cómo funciona el sensor de una cámara digital*. Qué cámara reflex comprar Copyright © 2018.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). *Uav photogrammetry for mapping and 3d modeling*. Zurich: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Rodríguez González, C. M. (2017). Puesta a punto de cámara térmica TAU-2-336 para acoplamiento a un Dron.
- Rodríguez, & Méndez. (2018). *Mediciones Ambientales tomadas en Reserva Ecológica Antisana*. Quito.
- Ruiz Sabina, J., Gallego Valle, D., Peña Ruiz, C., Molero García, J., & Gómez Laguna, A. (2015). *Aerial Photogrammetry by drone in archaeological sites with large structures. Methodological approach and practical application in the medieval castles of Campo de Montiel*. Ciudad Real: Virtual Archaeology Review.
- Saldaña Aguirre, J., Hernández Castañeda, K., Báez, P., Morales, R., & Leal López, M. (2016). Análisis y Selección de las Plataformas Digitales y Componentes de Potencia. *Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Tlaxcala 2016*.
- Sánchez Martín, N., Arias Pérez, B., González Aguilera, D., & Gómez Lahoz, J. (2004). Análisis aplicado de métodos de calibración de cámaras para usos fotogramétricos. *VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía*. Madrid.
- Senthilkumar, G., Gopalakrishnan, K., & Sathish Kumar, V. (2014). *Embedded image capturing system using raspberry pi system*. Coimbatore: International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science (IJETTCS).

- Sigcha Pilatuña, W. N. (2018). *Diseño de una estrategia de gestión energética para un sistema de almacenamiento de energía eléctrica de una plataforma robótica usada para la identificación de sustancias explosivas*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control.
- Sobczak, J., & Samolyk, M. M. (2013). *Development of an algorithm for estimating Lead-Acid Battery State of Charge and State of Health*. Karlskrona: Blekinge Institute of Technology.
- SPAINLABS.COM. (10 de Diciembre de 2013). *SpainLabs - Comunidad 3D, Arduino, Raspberry, CNC, y más*. Obtenido de <https://www.spainlabs.com/foros/tema-Tutorial-Como-ejecutar-scripts-al-iniciar-nuestra-Raspberry>
- Teensy, P. (26 de Noviembre de 2018). *Teensy USB Development Board*. Obtenido de <https://www.pjrc.com/teensy/>
- Viera Pérez, J. C. (2003). *Carga rápida de baterías de Ni-Cd y Ni-MH de media y gran capacidad. Análisis, síntesis y comparación de nuevos métodos*. Oviedo: Universidad de Oviedo.
- Watrín, A., Blunier, B., & Miraonui, A. (2012). *Review of adaptative systems for lithium batteries state of charge state of health estimation*. Michigan.
- Zabaleta, J., Biurrun, I., & Pascual, J. (2016). *Cálculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido: diseño y validación experimental*. Pamplona: Universidad Pública de Navarra.