

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FÍSICA



**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
ADQUISICIÓN DE IMÁGENES PARA EL
NANOSATÉLITE CHASQUI-I”**

TESIS PRESENTADA POR:
ANTONINO ESPINOZA CÁRDENAS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FÍSICO

Asesor:
Lic. Germán Comina Bellido

LIMA – PERÚ

2011

Resumen

En el presente trabajo se describe el desarrollo del sistema de adquisición de imágenes para el nanosatélite Chasqui-I. El sistema consta de dos cámaras digitales con diferente sensibilidad espectral, un circuito electrónico y el software de control. También, se desarrolló algoritmos para la predicción y para el tratamiento digital de imágenes. Las cámaras digitales pueden tomar fotos alrededor de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y presiones aproximadas a 10^{-2} mbar. Además en las pruebas iniciales se tomaron fotos a alturas de 300 m. El presente trabajo fue desarrollado en el Centro de Tecnología de Información y Comunicaciones (CTIC) en la Universidad Nacional de Ingeniería en Lima – Perú dentro del proyecto Chasqui-I.

Contenido

1	Introducción.....	1
2	Antecedentes.....	3
3	Sistema para obtención de imágenes digitales	6
3.1	Sistemas Ópticos.....	6
3.1.1	Lentes delgadas	6
3.1.2	Lentes comerciales para cámaras	7
3.1.3	Filtros Ópticos	9
3.2	Efecto fotoeléctrico y el sensor de imagen.....	11
3.3	El sensor de imagen basado en tecnología CCD	14
3.4	El sensor de imagen basado en tecnología CMOS	16
3.5	Ventajas y Desventajas entre un sensor de imagen CMOS y uno CCD	17
3.6	Teoría del Color.....	18
3.7	Filtro de Bayer.....	22
3.8	La fotografía digital	25
3.8.1	Fotografía digital en el rango del espectro electromagnético visible	27
3.8.2	Fotografía digital en el rango del espectro electromagnético infrarrojo cercano	27
3.9	Formatos de compresión de archivos de imágenes digitales.....	28
3.9.1	El formato JPEG.....	29
3.10	Protocolos de Comunicación.....	36

3.10.1	Protocolo de comunicación UART.....	36
3.10.2	Protocolo de comunicación SPI.....	37
3.11	Cálculo de la región fotografiada por el nanosatélite CHASQUI-I.....	38
4	Planteamiento del Problema.....	42
5	Diseño e implementación del Subsistema SIMA.....	48
5.1	Diseño e implementación del hardware y software.....	51
5.1.1	Diseño e implementación del hardware.....	51
5.1.2	Diseño e implementación de software.....	62
5.2	Integración y Pruebas.....	71
5.2.1	Primera prueba del prototipo de vuelo del nanosatélite Chasqui-I.....	73
5.2.2	Pruebas de temperatura.....	75
5.2.3	Pruebas de presión.....	80
5.2.4	Pruebas de Consumo de Corriente.....	82
6	Resultados y Discusiones.....	84
6.1	Hardware y Software.....	84
6.2	Pruebas de Temperatura.....	86
6.3	Pruebas de Presión.....	88
6.4	Pruebas de Integración.....	89
7	Conclusiones y sugerencias para trabajos futuros.....	91
7.1	Conclusiones.....	91
7.2	Sugerencias para trabajos futuros.....	92
8	Anexos.....	93
8.1	Código implementado.....	93
9	Bibliografía.....	94

1 Introducción.

La tecnología aeroespacial en el Perú ha sido poco explorada. El Centro de Tecnologías en Información y Comunicaciones (CTIC) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) ha apostado por desarrollar la tecnología cubesat [1,2] a través del primer proyecto educativo llamado "Investigación en tecnología satelital, nanosatélite CHASQUI-I" [3]. El término nanosatélite es utilizado para describir a satélites artificiales que tienen una masa entre 1 kg y 10 kg. El proyecto se basa en el desarrollo y lanzamiento de un pequeño satélite (nanosatélite CHASQUI-I) del tipo cubesat, el cual es un pequeño satélite artificial que tiene un volumen no mayor a 1 L y una masa no mayor a 1.33 kg [4]. El nanosatélite CHASQUI-I debe tomar fotografías de la tierra y transmitir las a una estación de recepción en tierra.

La construcción del nanosatélite CHASQUI-I involucra diferentes áreas de la ingeniería. Por eso, el diseño del CHASQUI-I se dividió en nueve módulos: EMEC - Estructura Mecánica, CCMI - Control Central y Manejo de la Información, PCT - Potencia y Control Térmico, SICOM - Sistema de Comunicaciones, SIMA - Sistema de Adquisición de Imágenes, SDCA - Sistema de Determinación y Control de Actitud, ESTER - Estación Terrena, SORS - Sistema de Órbitas y MIP - Módulo de Integración y Pruebas [8]. A cada módulo se le asignó un objetivo diferente. Además, entre los módulos, se encontraron a tesis y asesores de diferentes carreras profesionales: Lic. Física, Ing. Física, Ing. Económica, Ing. Electrónica, Ing. de Telecomunicaciones, Ing. de Sistemas, Ing. Mecánica, Ing. Mecatrónica e Ing. Química. Por eso, la dependencia que existe entre un módulo y otro, lo cual hizo de este proyecto un gran reto; ya que, todos los involucrados tenían que estar en constante comunicación. Se informaba de todos los detalles avanzados por más pequeño que fue durante todas las etapas de desarrollo: diseño, integración, pruebas y correcciones. El nanosatélite CHASQUI-I es la iniciación de la tecnología aeroespacial en el Perú.

Los objetivos generales del proyecto satelital fueron fomentar la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación mediante la incursión en nuevos temas de investigación como el campo satelital, para contribuir con el desarrollo científico y tecnológico del país; y formar especialistas en el área satelital para brindar apoyo y soporte a los diversos organismos nacionales encargados de implementar las políticas de desarrollo aeroespacial.

El objetivo del presente trabajo de tesis es diseñar y construir un sistema de adquisición de imágenes que le permita al nanosatélite CHASQUI-I tomar fotos de la tierra en diferentes bandas espectrales. Para alcanzar el objetivo se realizó:

- El estudio de diferentes sistemas de adquisición de imágenes usados por misiones satelitales equivalentes en diversas universidades.
- Pruebas de validación del sistema de adquisición del nanosatélite CHASQUI-I a temperaturas y presiones bajas.
- La documentación de todo el trabajo realizado para que se tome como un manual para futuros trabajos con características similares.

La principal contribución de esta tesis fue construir el sistema de adquisición de imágenes (SIMA) para el nanosatélite CHASQUI-I. El cual consta de dos cámaras digitales; la primera, una cámara digital que adquiere imágenes sólo en el espectro electromagnético visible (cámara Visible) y otra que adquiere imágenes en el espectro electromagnético infrarrojo cercano (cámara NIR). Las imágenes adquiridas se almacenaron en una memoria SD. Las contribuciones fueron:

- El diseño de un sistema de adquisición imágenes que tome fotos en la banda del espectro electromagnético infrarrojo cercano, hasta la realización de este trabajo no existía un satélite artificial del modelo cubesat que tome fotos en la banda NIR. En este tipo de fotografías se puede apreciar el contraste entre las zonas de vegetación y las zonas áridas, de esta manera, podemos apreciar las zonas deforestadas en el Perú.
- Desarrollo de pruebas del sistema de adquisición de imágenes a temperaturas alrededor de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a presiones de 10^{-2} mbar.
- Desarrollo de toma de fotografías a diferentes alturas.

2 Antecedentes

Un cubesat es un satélite con un volumen no mayor a 1.0 L y masa no mayor a 1.33 kg [4]. La denominación cubesat fue forjada por la Universidad de Standford y la Universidad Politécnica del Estado de California. Los principales autores de este proyecto fueron el Prof. Jordi Puig-Sauri, quien trabajaba en el Laboratorio de Desarrollo de Sistemas Aeroespaciales de la Universidad de Standford. El proyecto fue desarrollado con el objetivo de implementar un pequeño sistema aeroespacial estándar económico, no mayor a los cien mil dólares americanos (\$ 100 000.00), con la finalidad de iniciar a diferentes universidades, alrededor del orbe, en la investigación aeroespacial.

En la actualidad, existen aproximadamente 40 proyectos de este tipo [5], por ejemplo:

1. En Estados Unidos, el QuakeSat desarrollado en la Universidad de Standford [6].
2. En Japón, el CUTE-1 construido en el Instituto de Tecnología de Tokio [7], el XI-IV en la Universidad de Tokyo [8].
3. En Canadá, el proyecto Canadian Advanced Nanospace Experiment tuvo como objetivo la construcción del nanosatélite CANX-1 implementado en la Universidad de Toronto [9].
4. En Alemania, el UWE-2 [10] desarrollado en la Universidad de Würzburg, el CompassOne Cubesat [11] construido por alumnos de la Universidad de Ciencias Aplicadas en Aachen.
5. En Italia, AtmoCube desarrollado en la Universidad de Trieste [12]
6. En Colombia, el Libertad-1 desarrollado en la Universidad Sergio de Arboleda [13].

El proyecto CompassOne sirvió de referencia al proyecto que realiza el nanosatélite Chasqui-I, el CompassOne fue lanzado en abril del 2008. Los objetivos trazados por este proyecto fueron:

- Adquirir imágenes de la tierra con una resolución de 640 pixeles x 480 pixeles.
- Probar el GPS Phoenix desarrollado por el DLR en órbita.
- Probar el control de orientación basado en la interacción de campos magnéticos.
- Verificar la funcionalidad del cubesat en el espacio.

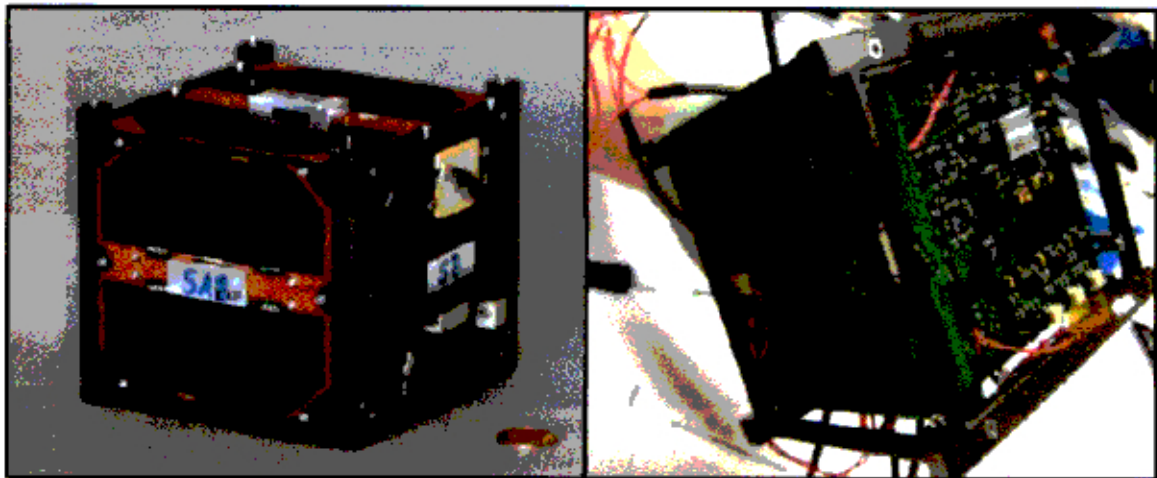


Figura 1. Dos fotografías del CompassOne: a la izquierda, el Compass con la estructura completa; a la derecha, el cubesat sin su cubierta, se observa los circuitos eléctricos [14,15].

Los resultados conseguidos por el CompassOne, ver Figura 1, fueron:

- Obtención de imágenes de la tierra adquiridas por el CompassOne y transmitidas a la estación terrena del proyecto; sin embargo, el sistema no tuvo un control automático de brillo, por lo cual las imágenes aparecen con una sobreexposición de brillo y se tiene poco contraste, ver Figura 2.
- La activación del GPS fue validada.
- La operación del modelo de vuelo del cubesat fue verificada de manera satisfactoria durante la órbita.

La Universidad de Tokyo con el CUTE-I [7], también, planteo objetivos y resultados similares a los del CompassOne. El Libertad I (Colombia) y el AtmoCube (Italia) no presentan como objetivo el adquirir imágenes de la tierra; sin embargo, tienen como meta la medición de temperatura y radiación en el espacio (unos 350 km de órbita de los cubesat), respectivamente. Todas las experiencias fueron muy enriquecedoras y nos sirvieron de guía para empezar con un diseño del Chasqui-I. El Perú se suma al grupo de países que han desarrollado cubesat con el nanosatélite Chasqui-I realizado en el CTIC de la UNI.

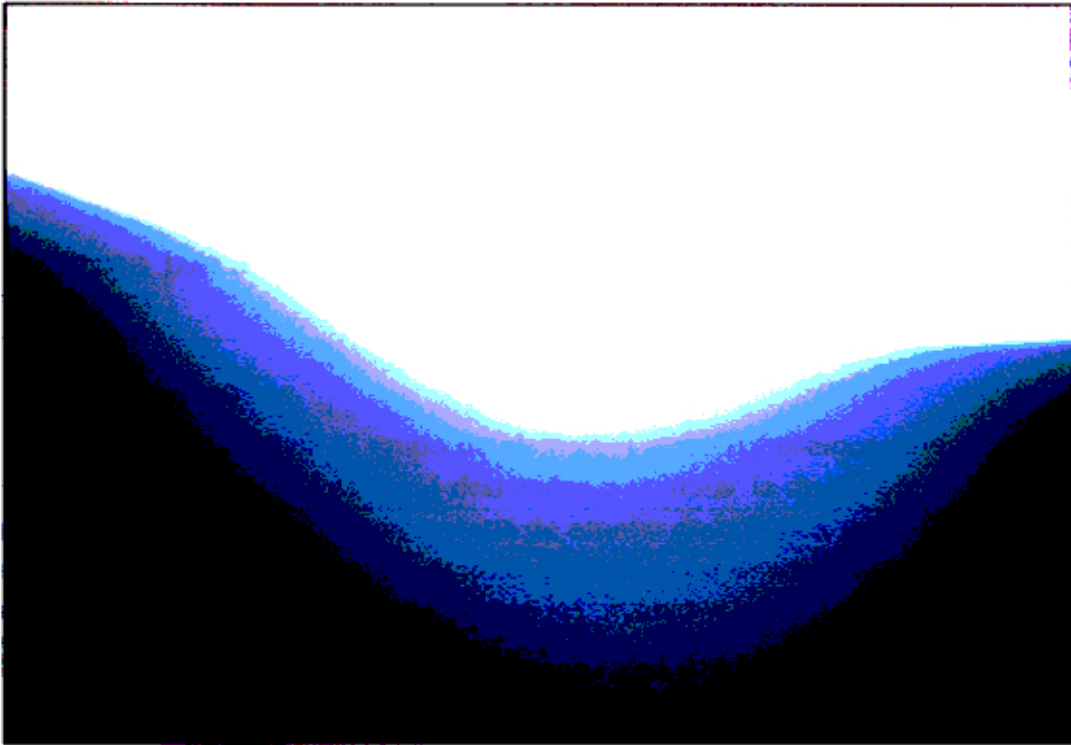


Figura 2. Una fotografía de la tierra tomada por el CompassOne en órbita. Se observa demasiado brillo captado por la cámara digital [16].

La mayoría de proyectos llevaron como carga útil una cámara que adquiere imágenes en la banda del espectro electromagnético visible como el CompassOne [11], otros portaron como carga útil sensores de temperatura, magnetómetro y GPS.

Para esta tesis se desarrolló un sistema que adquiriera imágenes en la banda del espectro electromagnético visible y también toma de fotografías en la banda del espectro electromagnético del infrarrojo cercano. Esta es la innovación en el Chasqui-I. La variedad de tecnologías en filtros ópticos y el manejo adecuado de estos dio la posibilidad de adquirir imágenes en el rango del espectro electromagnético del infrarrojo cercano. La fotografía digital en el rango del espectro electromagnético infrarrojo cercano se discutirá más adelante.

Se apreció que, en una década (1999-2009) se incrementó la cantidad de universidades que desarrollaron tecnología cubesat.

3 Sistema para obtención de imágenes digitales

3.1 Sistemas Ópticos

Se denomina sistema óptico al grupo de elementos ópticos (tenemos como ejemplo los prismas, espejos, cuñas, lentes, etc.) destinados a cambiar la dirección de propagación de la luz. Los sistemas ópticos son materia de estudio de la óptica geométrica. La óptica geométrica trata sobre manejar los frentes de onda con el uso de material reflejante, como los espejos, y material refractor, como los prismas o las lentes.

3.1.1 Lentes delgadas

Una lente es un sistema óptico diseñado con dos o más superficies refractoras en el cual una por lo menos se exige que sea una superficie curva. Algunas características de las lentes delgadas: Las superficies no planas deben estar centradas a un mismo eje; las propiedades de transmisión de las superficies no planas de las lentes son controladas.

Se denomina *lente simple* a la que está formada por solo dos superficies refractoras. Por otro lado, las *lentes compuestas* son aquellas formadas por más de dos superficies refractoras. Una denominación importante es la de *sistema óptico centrado*, es todo aquel donde las superficies refractoras presentan simetría axial. Se denomina simetría axial a la invariancia de un sistema bajo rotación con respecto a algún eje [18]. Ese eje se denomina eje óptico.

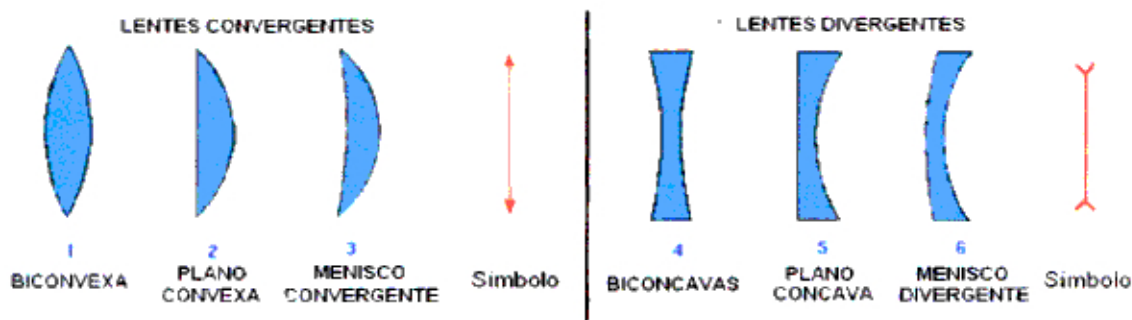


Figura 3. Lentes convergentes a la izquierda de la Figura: (1) biconvexa, (2) plano convexa y (3) menisco convergente. Lentes divergentes a la derecha de la Figura: (4) bicóncavas, (5) plano cóncava, (6) menisco divergente.

Las lentes se clasifican por tipos: lentes convergentes, el ancho del centro de las lentes es mayor que el ancho de los extremos de la lente, también son conocidas como lentes convexas o positivas, el fenómeno que ocurre es que la onda se hace más convergente conforme atraviesa la lente (concorre en un punto); y las lentes divergentes, presentan otra denominación conocida que es lentes cóncavas o negativas, el ancho en el centro de la lente es menor que en los extremos, el frente de onda que pasa a través de la lente se hace más divergente luego de pasar por este.

3.1.2 Lentes comerciales para cámaras

Las lentes para fotografía han sido usadas desde el año 1840. Los sistemas de lentes para cámaras son convergentes, estos pueden ser juegos de 3 o más lentes. Los sistemas de un solo lente son muy poco usados. El diseño de las lentes ahora se realiza por computadoras [19]. Las características del diseño de una lente y las técnicas para su elaboración no son parte de esta tesis. Sin embargo, es importante conocer algunas definiciones.

El **diafragma** de una lente es una abertura (agujero) o el borde del lente que limita la cantidad de luz que se transfiere de la imagen. Se definen dos diafragmas: diafragma de apertura (D.A.), el borde de una lente o un agujero que limita la cantidad de luz transferida, diafragma de campo (D.C.), es la región del espacio que determina el tamaño de la imagen que puede formar el sistema óptico.

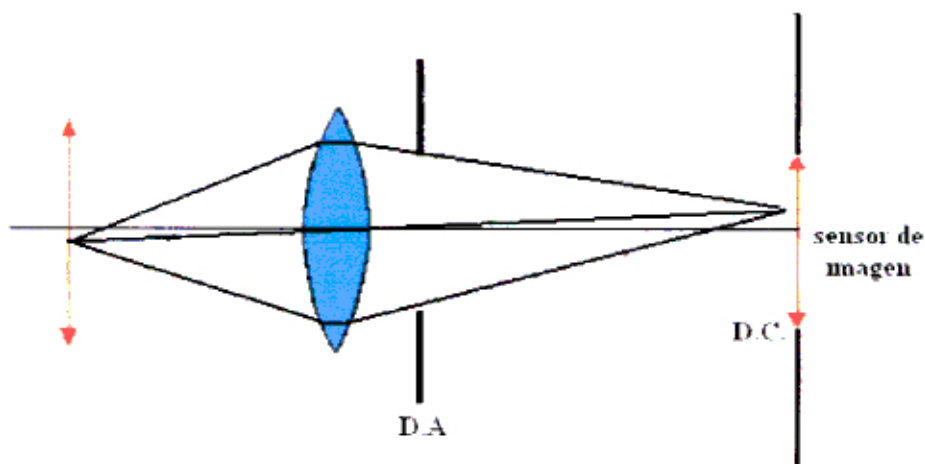


Figura 4. El diafragma de apertura (D.A.) es limitado por obstáculos físicos como es un agujero, el diafragma de campo (D.C.) es limitado por el tamaño del sensor de imagen.

La **apertura relativa** es una definición de suma importancia. Esta se define como la razón entre el diámetro (D) del diafragma de apertura de la cámara (o sistema óptico para fotografías) y la distancia focal del arreglo de lentes (f); es decir, el valor de D/f . El inverso de esta razón se conoce como el **número- f** o $f/\#$ o $F^\#$.

El **campo de visión** (*field of vision* que se referencia con las siglas FOV), hay algunos autores que utilizan la denominación de campo de vista angular. Se define FOV como el ángulo que comprende desde el centro del lente hasta un círculo que encierra el área del sensor electrónico de imagen o la película [20].

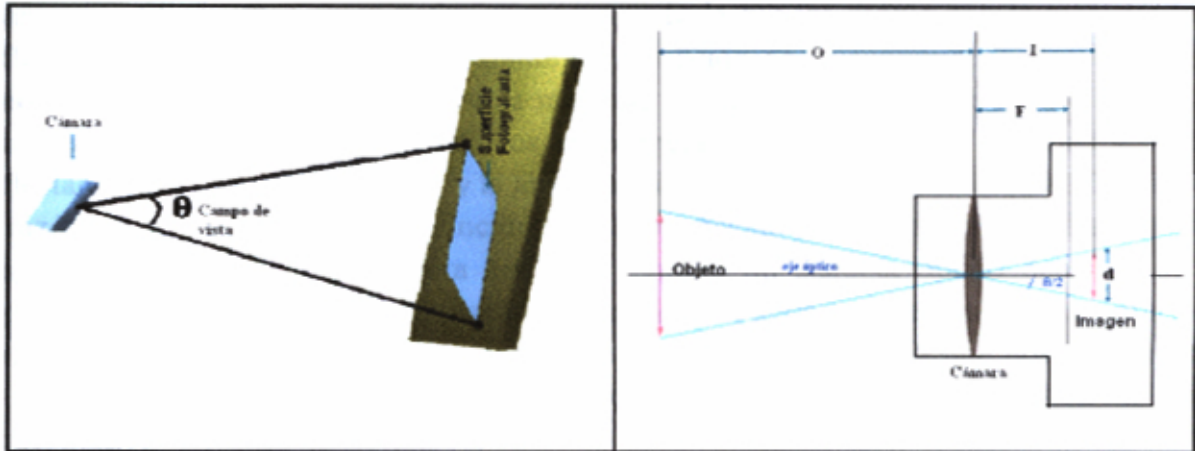


Figura 5. Campo de visión definido por θ .

En la Figura 5, se presenta una imagen ilustrativa del Campo de visión o Campo de visión (a la izquierda) y un esquema (derecha) que muestra tres parámetros: O , representa la distancia del objeto a la lente de la cámara; I , la distancia de la lente al sensor de imagen electrónico; y F , la distancia focal de la lente. El ángulo de vista se puede hallar según la expresión

$$\tan(\theta/2) = \frac{d/2}{I} \quad \dots (1)$$

Por tanto,

$$\theta = 2 \cdot \arctan\left(\frac{d/2}{I}\right) \quad \dots (2)$$

Para objetos muy alejados el valor de I debe ser igual al valor de F [47]. Con lo cual obtenemos

$$\theta = 2 \cdot \arctan\left(\frac{d}{2F}\right) \quad \dots (3)$$

El problema consiste en definir cuándo un objeto es muy alejado. Esto dependerá del tipo de cámara a utilizar, sobretodo de sus especificaciones técnicas. Este detalle se aclarará al momento de realizar los cálculos, para esto utilizaremos como ejemplo las cámaras del proyecto. Una observación es que el sistema de lentes es representado solo por una lente equivalente convergente en la Figura 5. No olvidar este detalle.

3.1.3 Filtros Ópticos

Un filtro óptico es un dispositivo que altera las propiedades espectrales de la luz incidente. Estos pueden ser de materiales como el vidrio de color, plásticos, polímeros o metales. El material más común de los filtros está hecho de vidrio; sin embargo, el filtro de plástico es un material muy usado. También, las películas delgadas de metales se usan como filtros. Ocurren tres fenómenos cuando la luz interactúa con la materia: la reflexión, es el reenvío de la luz radiante sin variación de su longitud; la transmisión, fenómeno por el cual la luz atraviesa la materia; y la absorción, fenómeno en el cual la luz es absorbida por la materia. En los experimentos las magnitudes medidas son la reflectancia [21], la transmitancia, y la absorbancia. La transmitancia está definida como la razón entre la intensidad de luz incidente y la intensidad de luz transmitida, las demás magnitudes se definen de manera análoga. Cuando un sistema óptico depende del espectro a estudiar o registrar, el diseñador del sistema debe tener en cuenta un criterio que es relacionado a la matemática del espectro. La matemática a la que nos referimos es la gráfica de "transmitancia vs longitud de onda". Es muy importante observar las características técnicas de los filtros; es decir, observar las especificaciones técnicas del filtro. Algunos catálogos importantes para la adquisición de filtros son Edmund Optics [22] y el catálogo de Schott [23] en su línea de filtros ópticos de vidrio. A continuación, unos filtros ópticos tomados de Edmund Optics. El filtro Kodak Wratten (ver Figura 6) para infrarrojo, no transmite espectro con longitudes de onda entre 400 nm a 700 nm y este filtro no se debe exponer a temperaturas mayores a los 50°, las dimensiones son de 75mm x 75mm x 0.1mm. La gráfica de transmitancia vs longitud de onda, Figura 7, muestra dos curvas: la gráfica del filtro 87, corta la transmisión del espectro con longitudes de onda mayores a 750 nm; y la del filtro 87C, corta la transmisión del espectro con longitudes de onda mayores a 800 nm.

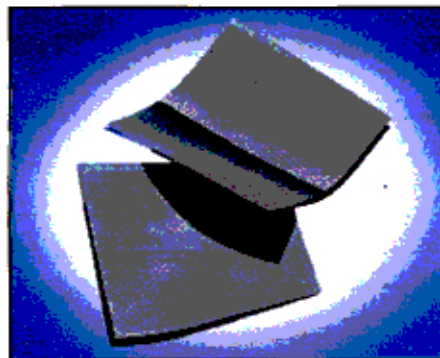


Figura 6. Filtro usado en las cámaras para captar el espectro electromagnético infrarrojo [24] cercano.

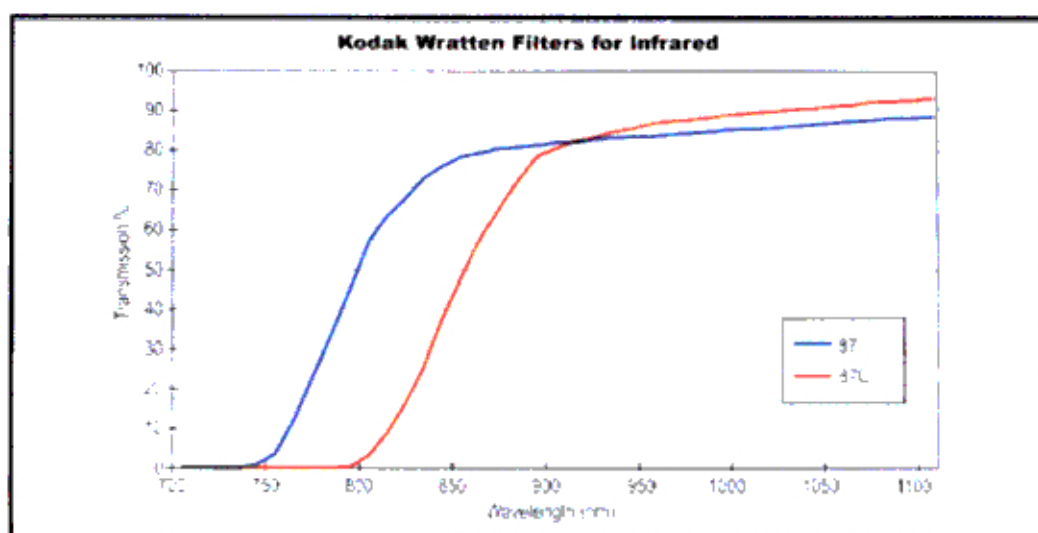


Figura 7. Gráfica de Transmitancia vs Longitud de onda para los filtros ópticos Kodak Wratten, explorar Technical Images en [24].

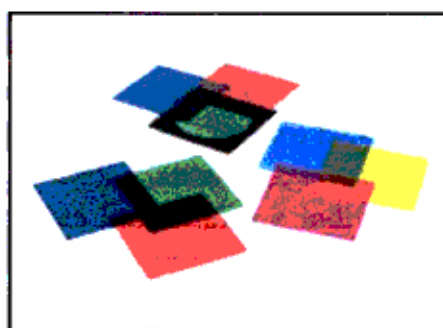


Figura 8. Filtros para luz roja, luz verde y luz azul marca Kodak Wratten, explorar Technical Images en [25].

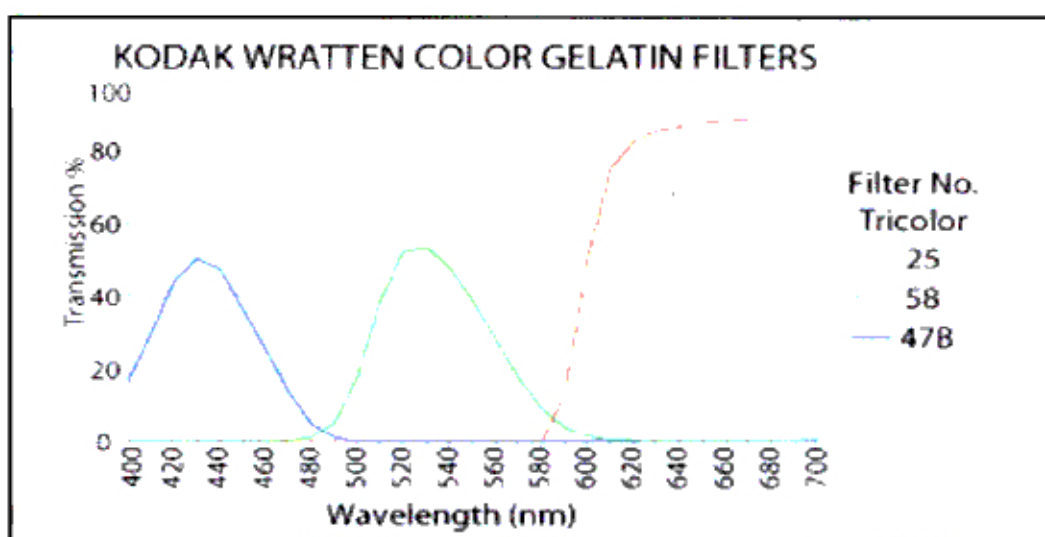


Figura 9. Gráfica de Transmitancia vs Longitud de onda para los filtros ópticos Kodak Wratten Color Gelatin Filters [25].

Los filtros Kodak Wratten Color Gelatin, ver Figura 8, presentan tres modelos de filtros: 25, 58 y 47B. En la Figura 9, se observa tres gráficas de transmitancia vs longitud de onda. La primera, de color rojo y correspondiente al filtro 25, corta el paso de longitudes de onda menores a 580 nm que corresponde al rango de la luz roja en la; la segunda, la de color verde y que pertenece al filtro 58, transmite espectro que presentan longitudes de onda en el rango de 400 nm a 580 nm, aproximadamente, que es el rango correspondiente a la luz verde; y la tercera, de color azul y que pertenece al filtro 47B, transmite el espectro que tiene longitudes de onda entre 400 nm y 480 nm que corresponde a luz azul. En conclusión, podemos decir que tenemos filtros que dejan pasar luz roja, luz verde y luz azul. Las características de estos tipos de filtros es tener textura de gelatina y no soportar temperaturas mayores a 50°, se adquieren de dimensiones 75mm x 75mm x 0.1mm.

3.2 Efecto fotoeléctrico y el sensor de imagen

El efecto fotoeléctrico es el fenómeno en el que los electrones de un material son liberados cuando el material es sometido a energía radiante. Heinrich Hertz fue uno de los primeros en apreciar este fenómeno; por otro lado, fue Albert Einstein quien explicó teóricamente el fenómeno. Einstein planteó que la radiación electromagnética transporta energía compuesta por paquetes indivisibles e individuales de energía, la energía que lleva cada paquete es directamente proporcional a la frecuencia de oscilación de la radiación correspondiente [26]. Estos paquetes de energía se conocían como cuantos de magnitud igual a $E_{\text{fotón}} = h\nu$ y en la actualidad se conocen más como fotones, donde

- $h = 6,6260755 \times 10^{-34} J \cdot \text{seg}$ es la constante de Planck [27].
- ν es la frecuencia de oscilación de la radiación electromagnética.

El aparato utilizado para observar el efecto fotoeléctrico se muestra en la Figura 10a. Se utiliza un tubo de vidrio al vacío donde se colocan dos electrodos, los cuales se conectan a una batería que proporcione una diferencia de potencial V ajustable. Luego, luz monocromática ilumina el cátodo liberando electrones. De esta manera, algunos de los electrones liberados viajan hacia el ánodo y giran alrededor del circuito. La corriente resultante se mide con el galvanómetro. En la situación experimental, un electrón abandona la superficie de un conductor, este término se aplica a cualquier material que permite el flujo cuando una fuente de voltaje se aplica a través de sus terminales, cuando logra romper la barrera de energía potencial. La función trabajo (Φ_0) del material es la cantidad de energía necesaria para que un electrón sea arrancado de la superficie. En la Figura 10b, la energía cinética del electrón que escapa de la superficie del conductor es

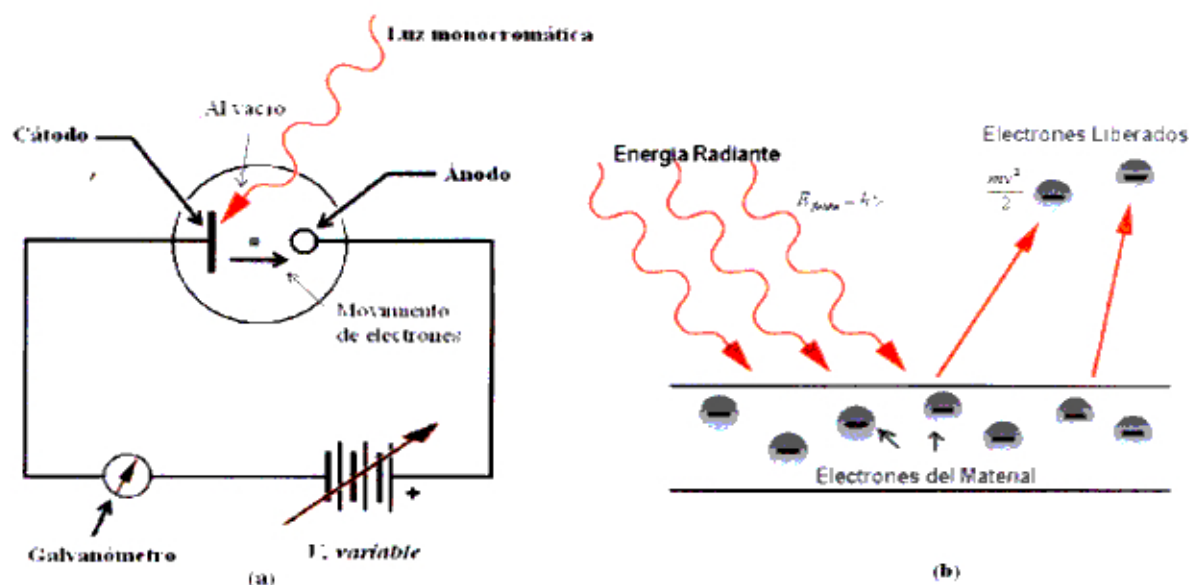


Figura 10. (a) La emisión fotoeléctrica de electrones se observa mediante el uso de este aparato [26]. (b) Representación esquemática del escape de un electrón de la superficie de un conductor, por ejemplo el Cátodo.

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - \Phi_0 \quad \dots(4)$$

El electrón que abandona el material deja un hueco libre. Formando un par electrón-hueco.

Los fotodetectores son aquellos que convierten las señales ópticas (fotones) en señales electrónicas (electrón-hueco) [28]. El efecto fotoeléctrico es el principio físico en el que se basa un fotodetector. El fotodetector realiza tres operaciones importantes:

- Generación de un par electrón libre y hueco provocado por la incidencia de la luz.
- Generación de corriente por la separación y colección de huecos y electrones;
- Producción de una señal eléctrica analógica de salida capaz de ser convertida en una señal digital.

Existen diversos dispositivos fotodetectores: fotodiodos, fototransistores, etc. [28]. El fotodiodo está basado en una juntura de un tipo-p y un tipo-n o una estructura formada por un tipo-p – aislante – un tipo-n, figura 11b. El material tipo-n se genera al agregar elementos impuros que poseen cinco electrones de valencia, como el antimonio, a una base de germanio o silicio. El material tipo-p se genera al agregar elementos impuros que poseen tres electrones de valencia, como el boro, a una base de germanio o silicio. El fototransistor es un transistor bipolar de estructura n-p-n o p-n-p, figura 11a. Esto puede ser visto como un fotodiodo y su amplificador [29].

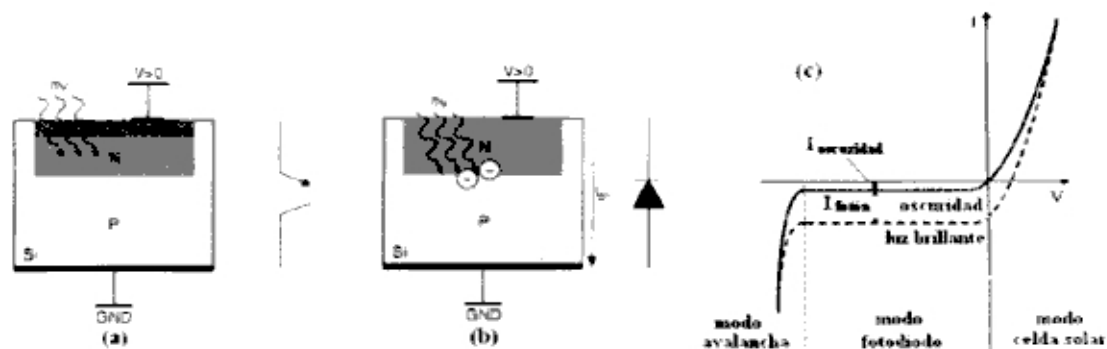


Figura 11. (a) fototransistor, vertical p-n-p. (b) Fotodiodo (c) Características del fotodiodo, gráfica corriente I vs voltaje V , página 61 y 62 de [29].

El fotodiodo puede ser operado en tres modos: fotovoltaico (modo celda solar), fotoconductor (modo fotodiodo) y modo avalancha. Estos modos dividen tres regiones en la gráfica 11c. Para los sensores de imagen, el dispositivo es frecuentemente operado en modo fotodiodo. Si el fotodiodo no es sometido a ninguna fuente radiante, oscuridad, y el voltaje aplicado se encuentra en el rango del modo fotodiodo; entonces, a través del fotodiodo circulará una corriente eléctrica $I_{\text{oscuridad}}$. Si el fotodiodo es sometido a una fuente radiante monocromática y el voltaje aplicado se encuentra en el rango del modo fotodiodo; entonces, a través del fotodiodo circulará una corriente eléctrica $I_{\text{fotón}}$ adicional a la corriente eléctrica en oscuridad. Por tanto, la corriente eléctrica a través del fotodiodo es la suma, $I_{\text{oscuridad}} + I_{\text{fotón}}$, observar la figura 11c.

Un sensor de imagen está formado por un arreglo de fotodetectores. La arquitectura de un sensor de imagen está compuesta por un arreglo fotosensible. Este arreglo consiste en elementos fotodetectores, los cuales se denominan “elemento de imagen” o “pixeles” [29]. El pixel es el responsable de convertir la intensidad de luz enfocada sobre ellos en voltaje, corriente eléctrica o carga eléctrica. La eficiencia cuántica (η) y el factor de relleno [28] se define según

$$\text{eficiencia cuántica} = \frac{\text{numero de pares electron - hueco creado}}{\text{numero de fotones que llegan al material}} \quad \dots (5)$$

$$\text{factor de relleno} = \frac{\text{area fotosensible en cada pixel}}{\text{area de cada pixel}} \quad \dots (6)$$

En la figura 12 se observa las gráfica de las respuestas espectrales del Silicio y del Selenio. El Silicio presenta una respuesta espectral entre 300-12000 nm. Por otro lado, el Selenio presenta una respuesta espectral en el rango entre 200-800 nm. Como la respuesta espectral del ojo humano está entre 400-700 nm. Un fotodetector fabricado de Silicio o Selenio es sensible al espectro visible. Además, el fotodetector de Silicio es

sensible al espectro de la región infrarrojo cercano (NIR, Near Infrared) cuyo rango es 760-900 nm [31], mas no el fotodetector de Selenio.

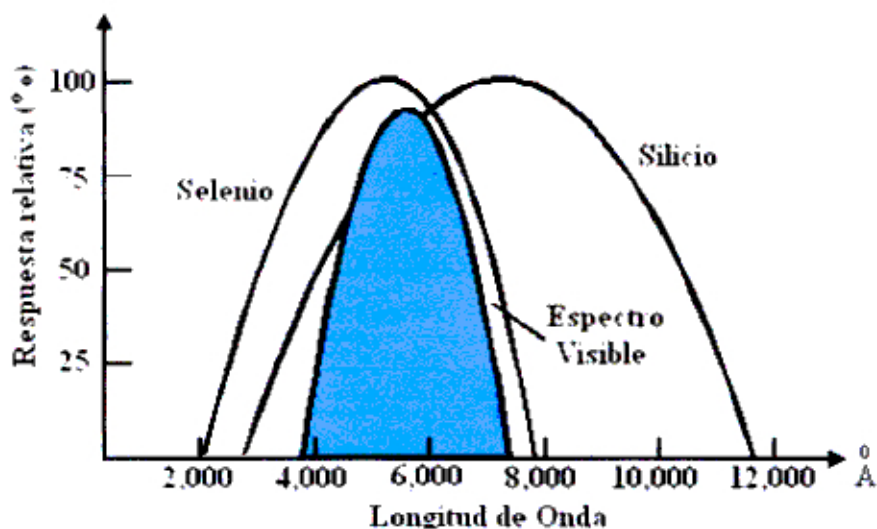


Figura 12. Respuesta espectral del Silicio y el Selenio en comparación con el ojo humano [30].

3.3 El sensor de imagen basado en tecnología CCD

Es un arreglo de varios pixeles fabricados con la tecnología CCD (Charge-Couple Device). Un pixel CCD está basado en una fotoc compuerta, una fotoc compuerta es un capacitor MOS el cual convierte los fotones incidentes en carga almacenada en el mismo. La producción de electrones generada por la incidencia de los fotones es almacenada en ciertos intervalos de tiempos, denominado tiempo de exposición, estos están en el rango de 100 μ s a 100 ms. La descarga de cada capacitor se genera de manera periódica. Por este motivo, se necesita un reloj que trabaja con una fuente de potencia externa. Se debe resaltar que el reloj cumple un papel importante en el dispositivo, ya que este va a marcar el ritmo de lectura de las señales de los pixeles.

La carga almacenada en un pixel CCD puede ser desplazada a su vecino más cercano aplicando una secuencia sincronizada de señales de voltaje a las dos compuertas. En la figura 13 se ilustra la transferencia de carga en un sensor CCD. El voltaje aplicado en la compuerta G2 está creciendo rápidamente al iniciar una transferencia de carga. Luego, el voltaje de la compuerta vecina G1 está decreciendo. Por tanto, la carga registrada en la compuerta G1 durante la fase de exposición es transferida como potencial a la compuerta G2.

Cuando se enfoca la imagen sobre el sensor CCD, cada uno de las fotoc compuertas recibe luz con cierta intensidad. La luz llega a la juntura del fotodiodo, se genera una interacción fotón-electrón, cada fotón le da la energía necesaria a un electrón para que pueda vencer la barrera de potencial definida en la juntura, generándose una carga

almacenada en el capacitor MOS. La transferencia de la carga ocurre de pixel a pixel hasta llegar al área de almacenamiento de la señal, luego es llevada a un convertor I/V (corriente-voltaje) y, finalmente, se puede acceder a ella, tal como se observa en la figura 14.

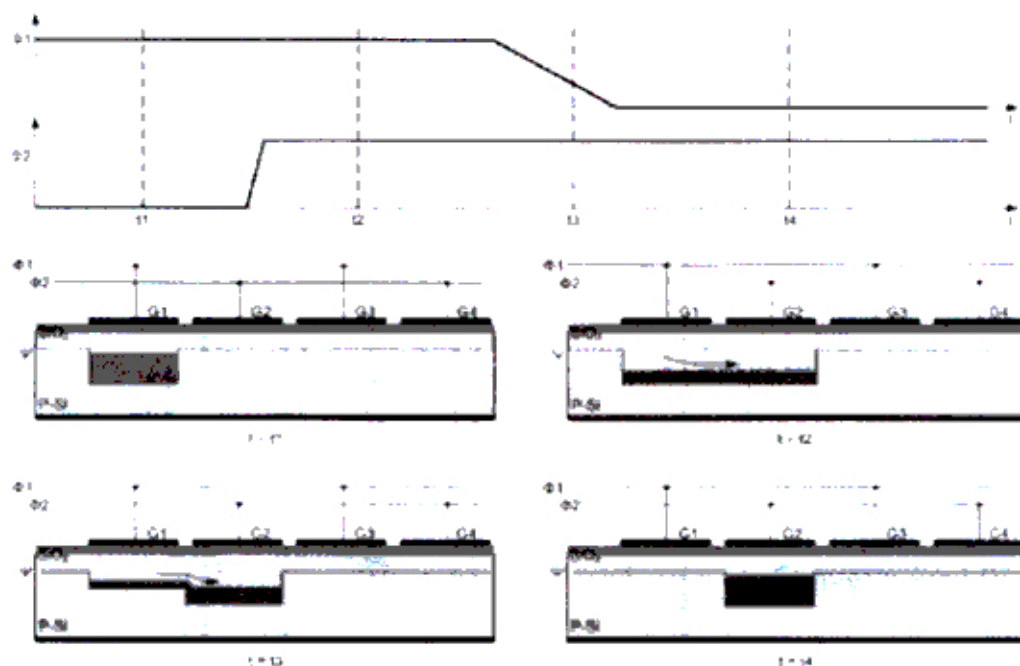


Figura 13. Esquematación de un ciclo de transferencia de carga en un CCD. Se muestran las fases de potencial aplicado con respecto del tiempo a las compuertas de G1 a G4 y el potencial superficial (Ψ) de los paquetes de carga que se mueven entre cambios de potencial como respuesta al potencial aplicado [29].



Figura 14. La transferencia de la señal eléctrica de un pixel tiene que ser transmitida de pixel a pixel para conseguir su posterior lectura. Se muestra que el sensor de imagen CCD transforma la señal óptica (fotones) en señales eléctricas analógicas.

3.4 El sensor de imagen basado en tecnología CMOS

El sensor de imagen CMOS (por sus siglas en inglés Complementary Metal Oxide Semiconductor) está formado por un arreglo de fotodiodos, un circuito fotodiodo está basado en fotodiodos que convierten la señal óptica en carga, corriente o voltaje eléctrico, ver figura 15, y convertidores corriente voltaje (I/V) ordenados en “M” filas y “N” columnas. El fotodiodo basado en el circuito modo de carga, Figura 15a, es comúnmente usado para la integración de los CMOS, su miniaturización. Los basados en el circuito modo voltaje convierten la fotocorriente en voltaje de salida basado en la resistencia, Figura 15b. Los construidos con el circuito en modo corriente son muy utilizados en ‘visión inteligente’ [29], Figura 15c.

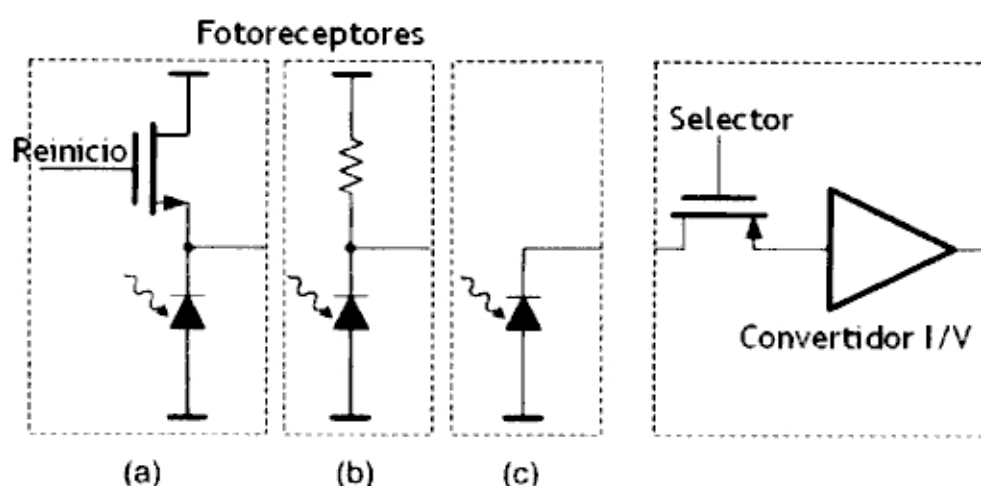


Figura 15. Fotodiodos CMOS con circuito eléctrico en (a) modo de carga, (b) modo voltaje y (c) modo corriente [29].

Cuando se enfoca la imagen sobre el sensor CMOS, cada uno de los fotodiodos recibe luz con cierta intensidad. Cuando la luz alcanza la juntura del fotodiodo se genera una interacción fotón-electrón, cada fotón le da la energía necesaria a un electrón para que pueda vencer la barrera de potencial definida en la juntura, produciendo una corriente eléctrica. Se incrementa la probabilidad de que un electrón venza la barrera de potencia y alcance la banda de conducción a mayor intensidad de luz, por tanto el número de interacciones también se incrementa, incrementándose el voltaje a la salida de conversor I/V. En los sensores CMOS, la señal producida por un fotodiodo se accede con los controladores de fila y columna. Esto permite tener dos opciones para el manejo de la señal: llevar las señales de los pixeles a un circuito externo mediante un amplificador de señal o utilizar un circuito integrado [30] convertidor analógico a digital, ADC por sus siglas en inglés Analog-to-Digital Converter. Por eso, la compatibilidad para generar sensores electrónicos CMOS con circuitos integrados conversores de señal analógicas a digitales (A/D), Figura 16.

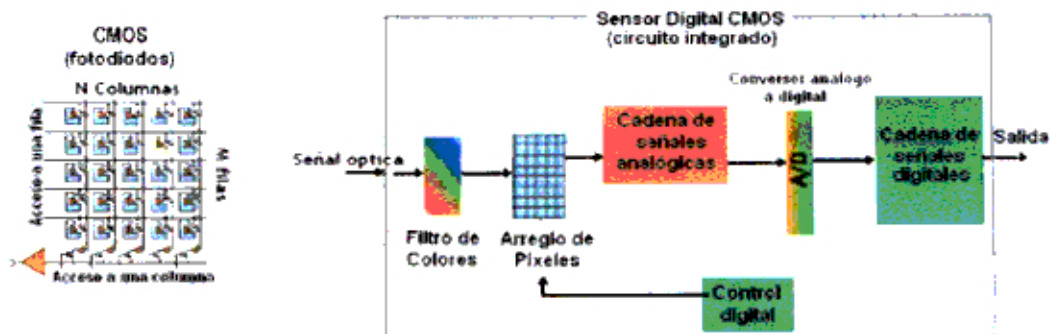


Figura 16. El acceso a la señal de un píxel CMOS, en esta gráfica se presenta en modo de corriente, se da de manera aleatoria. El sensor de imagen CMOS da como salida una señal eléctrica digital.

3.5 Ventajas y Desventajas entre un sensor de imagen CMOS y uno CCD

Los sensores de imagen CMOS tienen como ventajas respecto a la tecnología de sensores de imagen basada en CCD:

- Bajo consumo en potencia, aproximadamente un sensor CMOS puede llegar a consumir la tercera parte de lo que necesita en potencia un CCD, además, trabajan a voltajes bajos como el 3.3V [32], en cambio las CCD no trabajan a voltajes menores que 12 V (este detalle es el más relevante en el presente trabajo).
- La factibilidad que tiene para integrar las señales y bloques de procesamiento de imagen como es el caso de los amplificadores ADCs, también, la compresión del archivo imagen sobre un mismo chip, todo esto denominado como alta integración.
- Compatibilidad con los circuitos TTL (0-5 V) [32].
- Acceso aleatorio de cualquier píxel del arreglo del sensor.
- Respecto al tamaño, el sensor CMOS ha alcanzado una alta miniaturización como ejemplo tenemos el sensor modelo HAM49002 producido por industria HITACHI con dimensiones de 7.0 mm x 7.6 mm x 4.9 mm.
- El corto intervalo de tiempo con la que se puede adquirir una imagen, para ilustrar tomamos nuevamente el sensor modelo HAM49002 que puede llegar a adquirir hasta 15 cuadros por segundo.

Sin embargo, la tecnología CMOS presenta algunas desventajas respecto a la tecnología CCD, a continuación, presentamos tres de ellas:

- Los sensores de imagen CMOS presentan menor sensibilidad que los CCDs. EL área fotosensible de un sensor CCD es mayor que en los CMOS, este es el porqué de la menor sensibilidad que hay en los CMOS; ya que, la sensibilidad se mide según el producto de el factor de relleno y su eficiencia cuántica; por tanto, al tener un área fotosensible menor se tiene un factor de relleno menor y esto, a su vez, reduce la eficiencia cuántica [32].
- Los sensores CMOS presentan mayor ruido, se llama ruidos a las señales eléctricas indeseables que puede aparecer en cualquier dispositivo electro-electrónico [34]. Se asocia principalmente a que cada fotosensor, en los CMOS, tiene su propio amplificador y como los amplificadores presentan diferencias esto contribuye a tener mayor corriente parásita, por tanto, mayor ruido.
- Lo anterior trae como consecuencia una calidad de imagen menor en las cámaras fabricadas con tecnologías CMOS [33].

3.6 Teoría del Color

La luz es energía radiante la cual, por su acción con el órgano de visión, habilita la función de ver [37]. La luz es radiación electromagnética perteneciente a un rango de longitudes de onda entre 350 a 780 nm. La sensación de luz se describe por el brillo (*Brightness*), el tono (*Hue*) y la saturación (*Saturation*). El brillo es la intensidad de luz que proporciona la luz radiante indiferente del color que se observe. El tono es el atributo de la luz que distingue una luz amarilla, de una luz verde o de una luz roja, etc. La saturación es el atributo que distingue la luz espectral de una luz pastel que presentan el mismo tono.

Entender el mecanismo de la visión humana permitirá diseñar un sistema de adquisición de imágenes eficiente. Primero, se describe el ojo humano. Llamado globo ocular, es un órgano par localizado en la parte superior de la cara con una dimensión aproximada de 20 mm. Tiene forma de una esfera achatada de arriba hacia abajo y, además, posee un diámetro aproximado de 20 mm. Se observa en la figura 17, la esclerótica, coroides y retina. Las cuales son tres membranas que forman las paredes del ojo. La esclerótica es una membrana dura fibrosa y resistente que forma el blanco del ojo. La córnea es transparente. La retina es la capa donde están reunidas las terminaciones nerviosas que habilitan la función de “ver”. El cristalino es una lente biconvexa localizada detrás del iris, la cual divide el ojo en dos cámaras. El iris es una membrana situada en la parte anterior del globo ocular, está en el medio presenta una abertura denominada pupila, la cual varía entre 2 a 8 mm. Existen diferentes colores de iris. El humor vítreo es una sustancia de consistencia gelatinosa y transparente localizada entre el cristalino y la retina. El humor acuoso es un líquido incoloro ubicado entre el iris y el cristalino [31,37].

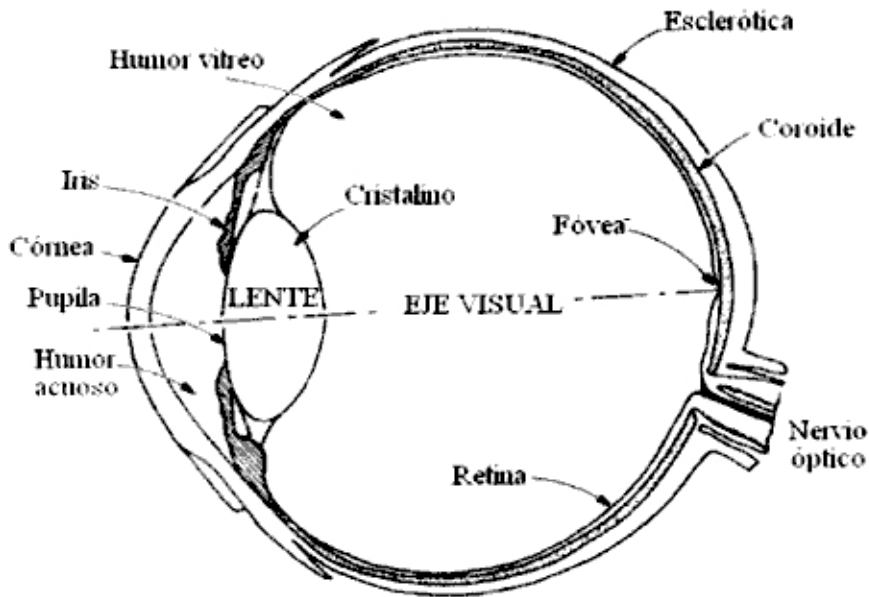


Figura 17. Sección horizontal transversal al ojo y que pasa por su eje [37].

Las terminaciones nerviosas, llamadas receptores, ubicadas en la retina son de dos tipos: conos y bastones. Los conos están localizados en la zona central de la retina, llamada Fovea. Estos son altamente sensibles al color y cada uno de ellos está conectado a su propio nervio. Cada ojo posee alrededor de 6 a 7 millones de conos. Los bastones están distribuidos sobre toda la retina. Estos son más sensibles a la luz de baja intensidad y todos ellos están unidos a un solo nervio. Cada ojo posee entre 75 a 15 millones de bastones. La distribución de conos y bastones se puede apreciar en la figura 18b. En la vecindad del nervio óptico no hay receptores, por tanto la imposibilidad de interactuar con la luz. Esta zona se llama "Punto ciego". La Fovea es la zona de mayor concentración de conos [31,37].

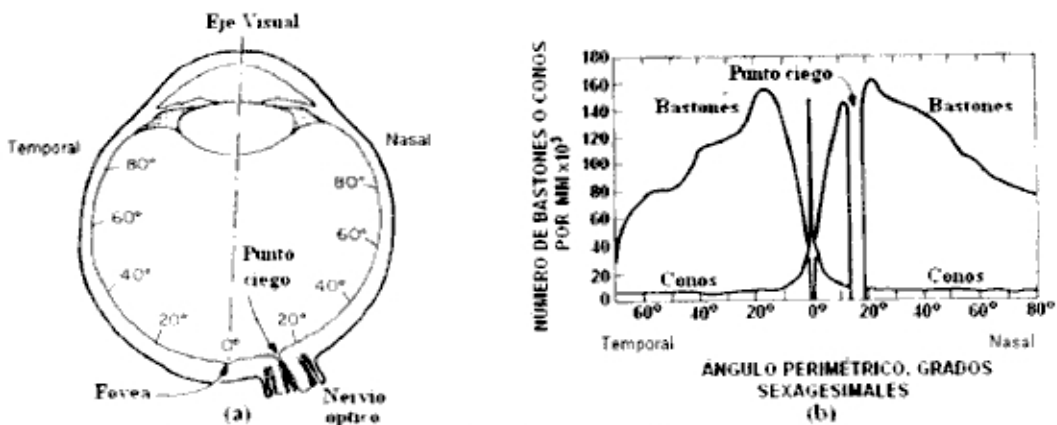


Figura 18. (a)Ángulos perimétricos en el ojo humano. (b) Distribución de conos y bastones en la retina [37].

En los últimos años, se ha determinado que hay tres tipos de conos en la retina, los conos son los responsables del color de la visión. Estos conos tienen diferentes características de absorción como una función de la longitud de onda con picos en el rojo, verde y azul [37]. Existen de unos 6 a 7 millones de conos en el ojo humano. El 65% de los conos son sensibles a la luz roja, 33% son sensibles a la luz verde y un 2% son sensibles a la luz azul (los conos que perciben azul son más sensibles). Debido a esta característica de absorción del ojo humano, los colores se observan debido a una combinación de colores, los llamados colores primarios, rojo (R, Red), verde (G, Green) y azul (B, Blue). Entonces, cuando un chocolate se observa de color marrón es producto de la luz reflejada sobre este. Por tanto, los colores que observamos en los objetos es producto de la propiedad de reflexión del objeto. La suma de los colores primarios producen los colores secundarios: magenta (rojo más azul), cian (verde más azul) y amarillo (rojo más verde). Mezclando los tres colores primarios se obtiene blanco o sumando un color primario con su opuesto secundario, también, se obtiene blanco. Los pares color primario y su opuesto secundario son el rojo-cian, verde-magenta y azul-amarillo.

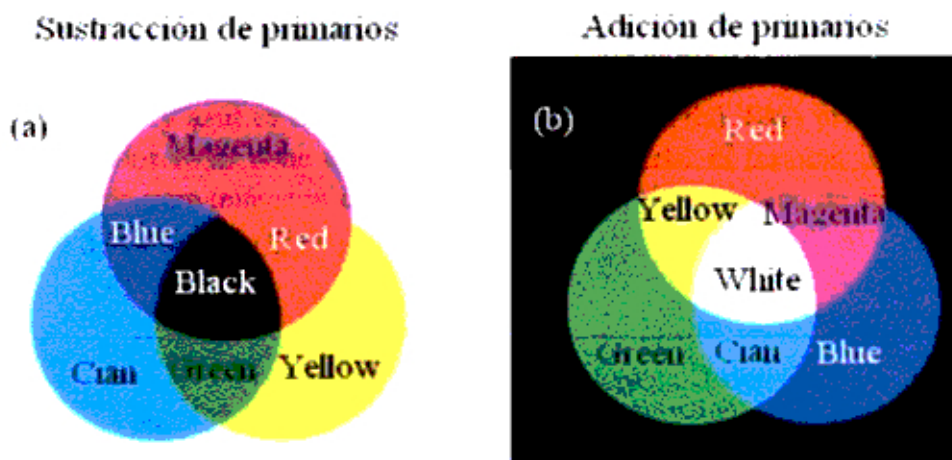


Figura 19. Pigmentos y colores primarios y secundarios [31].

Los valores triestímulos son cantidades necesarias de rojo, verde y azul para formar un color. Estos se denotan por X , Y y Z respectivamente. Entonces, se define el coeficiente tricromático de un color A (el cual es el producto de la suma de X , Y y Z) como

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad \dots(7)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad \dots(8)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad \dots(9)$$

de lo anterior, $x + y + z = 1$.

El modelo de color se puede especificar en un sistema coordenado donde cada sistema de color es representado como un único punto. Se conoce también como *espacio de color* o *sistema de color*. El procesamiento digital los modelos más usados son el RGB (red, green, blue) usadas para el color de los monitores y muchas video cámaras; el modelo CMY (cyan, magenta, yellow) y el CMYK (cyan, magenta, yellow, black) para impresoras de color; y el HSI (hue, saturation, intensity) que se asemeja a como el ojo humano registra el color [31]. En el modelo de color RGB se plantea que cada color es la suma de sus componentes espectrales primarios de rojo, verde y azul. Este modelo replica al sistema coordenado. Cada color es representado como un vector que parte del origen. El rojo se representa por el vector unitario \hat{i} , el verde por \hat{j} y el azul por \hat{k} . Para hallar la posición de cualquier otro color se da como ejemplo el blanco. El blanco es la suma de todos los colores primarios, por tanto la posición del blanco es

$$P_{blanco} = \hat{i} + \hat{j} + \hat{k} = (1,1,1) \quad \dots(10)$$

De esta manera los valores de R, G y B están normalizados con valores entre [0,1]. Las imágenes representadas en el modelo de color RGB consisten de tres componentes, una para cada color primario. La *profundidad de pixel* es el número de bits utilizado para representar cada pixel en sistema RGB. Considerando una imagen RGB en la cual una imagen roja, verde y azul es representado por un byte (8 bits). Bajo estas condiciones cada pixel de color RGB tiene una profundidad de 24 bits. El termino imagen a *full-color* es denotado para imágenes de color de 24 bits. El número total de colores en una imagen RGB de 24 bits es $(2^8)^3 = 16,777,216$

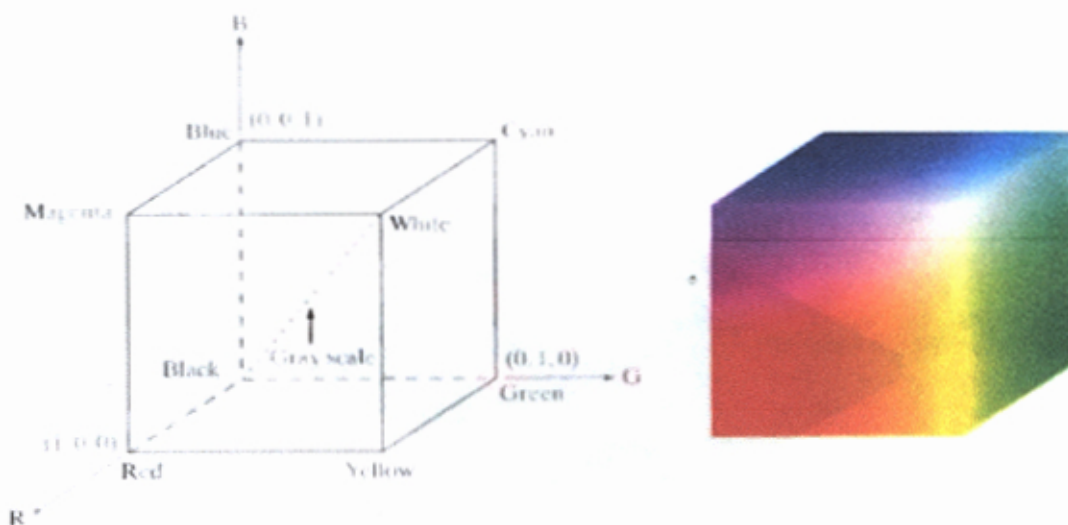


Figura 20. (a) Esquema del cubo RGB semejante al sistema coordenado cartesiano. (b) Cubo de color RGB de 24-bits [31].

El modelo de color YCbCr es un espacio de color aditivo que usa como modelo de color una componente de brillo (Y, brightness) y dos componentes cromáticas (Cb y Cr). La señal luminosa es codificada con mayor precisión que la componente cromática. YCbCr

es usado en procesamiento digital de video y comprensión de imágenes JPEG. El detalle de los modelos de colores no mencionados se encuentra en la bibliografía [31, 37,38].

3.7 Filtro de Bayer

Es un arreglo de filtros de colores llamado "Filtro de Bayer", denominado así por su creador [36]. Este es una película delgada fabricada sobre el arreglo de fotosensores. De esta manera, los fotosensores interactúan con radiación que presenta longitudes de onda entre 390 nm y 700 nm. Cada fotosensor presenta un filtro para la luz roja (564-580 nm), o verde (534-545 nm) o azul (420-440 nm). La cantidad de fotosensores que registran la luz verde representa el 50% de la cantidad total de fotosensores, de esta manera se trata de imitar al comportamiento del ojo humano cuando interactúa con la luz. Eléctricamente, el sensor de imagen producirá un arreglo $M \times N$ de $P(x,y)$, cuyos valores son linealmente proporcional a la intensidad de la luz incidente sobre cada pixel. P en la posición (x,y) sólo se puede interactuar con luz roja $R(x,y)$, o verde $G(x,y)$ o azul $B(x,y)$ [37]. Sin embargo, para generar una imagen de color RGB necesitamos registrar los tres colores para un mismo fotodetector. Se soluciona este problema interpolando los valores $R(x,y)$, o $G(x,y)$ o $B(x,y)$ con sus vecinos próximos. $R(x,y)$, $G(x,y)$ y $B(x,y)$ representan la palabra digital para un pixel en el modelo RGB.

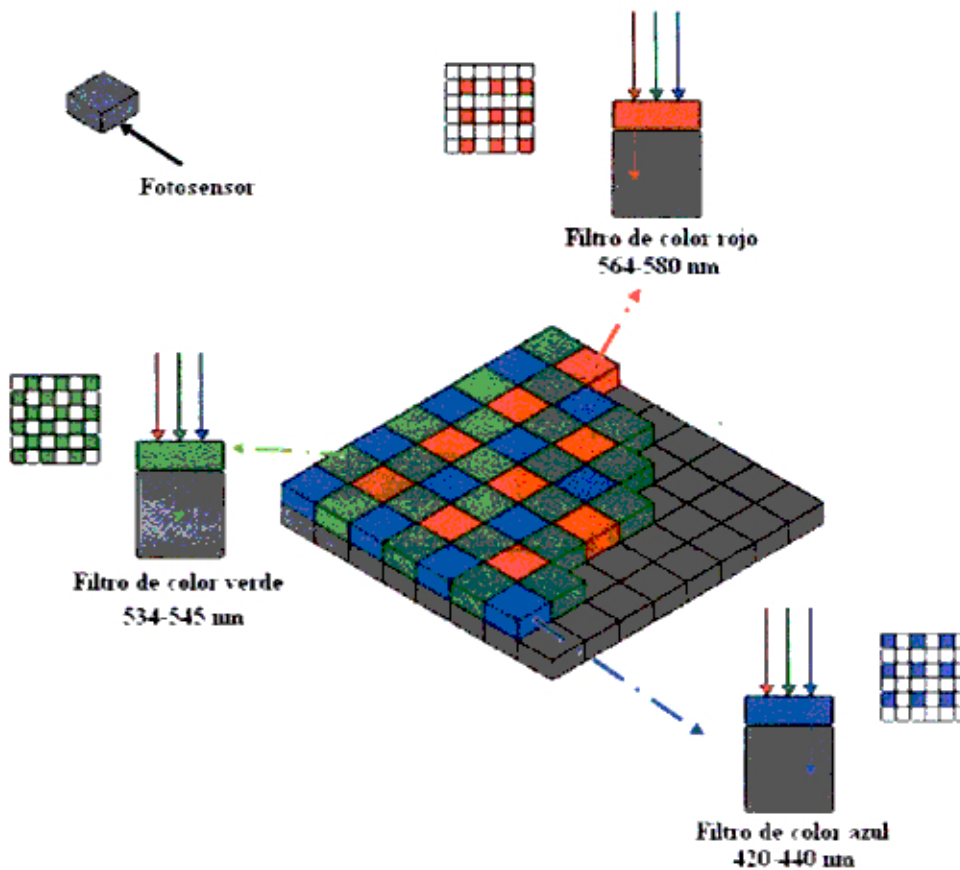


Figura 21. Esquema del Filtro de Bayer sobre un sensor de imagen.

Una interpolación simple es usar un subarreglo de píxeles de 2×2 . Como ejemplo usamos el sub arreglo $\{P(x,y), P(x-1,y); P(x, y+1), P(x-1,y+1)\}$ y calculamos los valores RGB para el pixel $P(x,y)$ y el pixel $P(x+1,y)$ según la figura 22. En este caso se aproxima el valor de interpolación al valor del pixel vecino más próximo que registra el color ausente en dicho pixel. Por ejemplo, el pixel $P(x-1,y)$ sólo registra rojo. Entonces,

$$R(x+1, y) = P(x+1, y) \quad \dots (11)$$

Luego, aproximando para el valor de G y B al valor de los vecinos más cercanos.

$$G(x+1, y) = P(x, y) \quad \dots (12)$$

$$B(x+1, y) = P(x, y+1) \quad \dots (13)$$

De manera análoga para (x,y)

$$G(x, y) = P(x, y), R(x, y) = P(x+1, y), B(x, y) = P(x, y+1) \quad \dots (14)$$

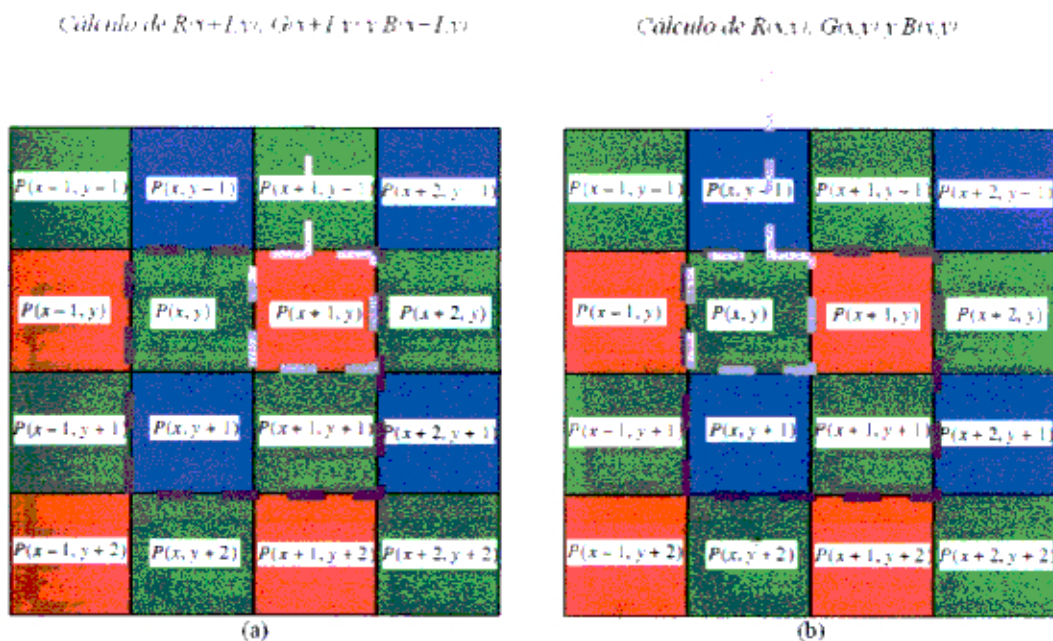


Figura 22. Interpolación usando un subarreglo 2×2 . (a) Se desea calcular el valor RGB de la posición del pixel $P(x-1,y)$ que sólo es sensible a la luz roja. (b) Se desea calcular el valor RGB de la posición del pixel $P(x,y)$ que sólo es sensible a la luz verde.

La interpolación que considera el promedio del registro de los píxeles vecinos cercanos del mismo color es un mejor resultado, figura 23. Este método toma un subarreglo de píxeles de 3×3 . La interpolación se trabaja sobre los mismos píxeles anteriores, (x,y) y $(x+1,y)$.

El pixel (x,y) es sensible a la luz verde. Por tanto,

$$G(x, y) = P(x, y) \quad \dots(15)$$

Para calcular R se promedia los pixeles vecinos que registren la luz roja. Entonces,

$$R(x, y) = \frac{P(x-1, y) + P(x+1, y)}{2} \quad \dots(16)$$

Se procede de manera análoga para B

$$B(x, y) = \frac{P(x, y-1) + P(x, y+1)}{2} \quad \dots(17)$$

El pixel $(x+1, y)$ es sensible a la luz roja. Entonces, de manera análoga al pixel anterior

$$R(x, y) = P(x, y) \quad \dots(18)$$

$$G(x, y) = \frac{P(x, y) + P(x+2, y) + P(x+1, y-1) + P(x+1, y+1)}{4} \quad \dots(19)$$

$$B(x, y) = \frac{P(x, y+1) + P(x+2, y+1) + P(x, y-1) + P(x+2, y-1)}{4} \quad \dots(20)$$

Cálculo de $R(x, y)$, $G(x, y)$ y $B(x, y)$

Cálculo de $R(x+1, y)$, $G(x+1, y)$ y $B(x+1, y)$

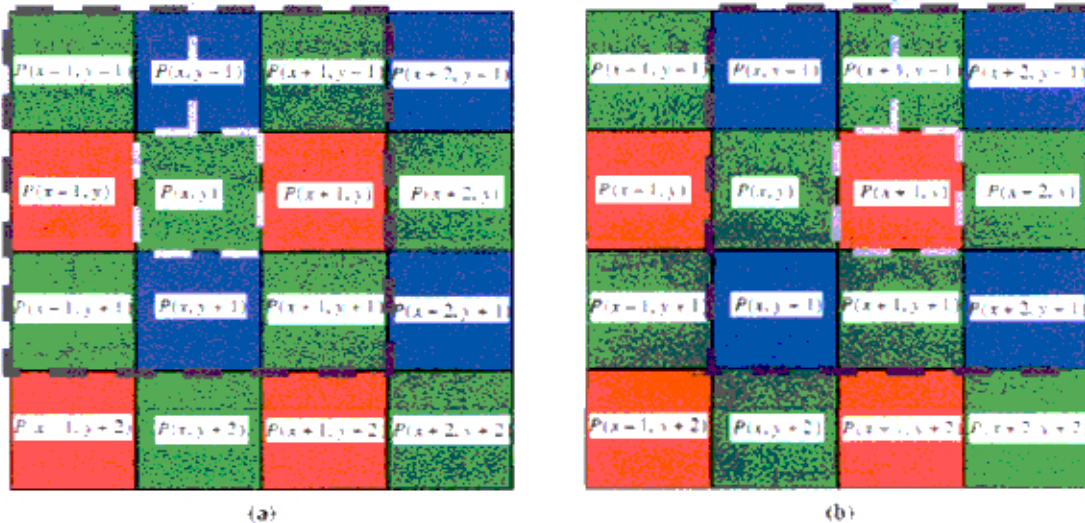


Figura 23. Interpolación usando un subarreglo 3x3. (a) Se desea calcular el valor RGB de la posición del pixel $P(x+1, y)$ que sólo es sensible a la luz roja. (b) Se desea calcular el valor RGB de la posición del pixel $P(x, y)$ que sólo es sensible a la luz verde.

3.8 La fotografía digital

La fotografía digital es la técnica por la cual se desea formar la imagen de un objeto, el cual se denomina objetivo fotográfico, sobre la superficie del sensor electrónico de imagen con el uso un sistema óptico convergente, para luego conservar la copia del objetivo fotográfico en una memoria digital (puede ser una tarjeta SD [17]).

Continuando con la descripción mecanismo de visión humana. En el subcapítulo 3.6 (Teoría del color), se describió el ojo humano. Cuando la luz reflejada en un objeto exterior al ojo atraviesa la córnea, después pasa a través del humor acuoso para pasar por el cristalino (lente) y continuar su recorrido atravesando el humor vitreo, llegando finalmente a la retina. Allí se forma una imagen invertida, observa la Figura 24a. Los músculos alrededor del ojo son los encargados de ajustar la curvatura del cristalino para que la imagen se enfoque en la retina. Cuando la imagen se forma antes de que la luz llegue a la retina se denomina miopía, y cuando la imagen se forma después de que la luz llegue a la retina se denomina hipermetropía. Cuando la imagen es formada en la retina, la luz interactúa con los conos y bastones y recorre a través del nervio óptico hasta llegar al cerebro. En el cerebro se forma la imagen que percibimos. De manera análoga al mecanismo de visión humana, la luz reflejada en un objeto exterior de la cámara atraviesa su sistema óptico, para ser enfocado sobre un sensor de imagen (CCD, o CMOS, o cualquier otro modelo de sensor), la imagen invertida se forma sobre el sensor de imagen, ver Figura 24b. Entonces, en el sensor de imagen cada fotosensor registra una porción de la imagen enfocada. La cual, por ejemplo en el modelo de color RGB con una profundidad de pixel de 24-bits, se registra como 3 bytes: un byte para el rojo, uno para el verde y otro para el azul. Entonces, la fotografía de color se forma por un arreglo de pixeles RGB-24bits, Figura 25.

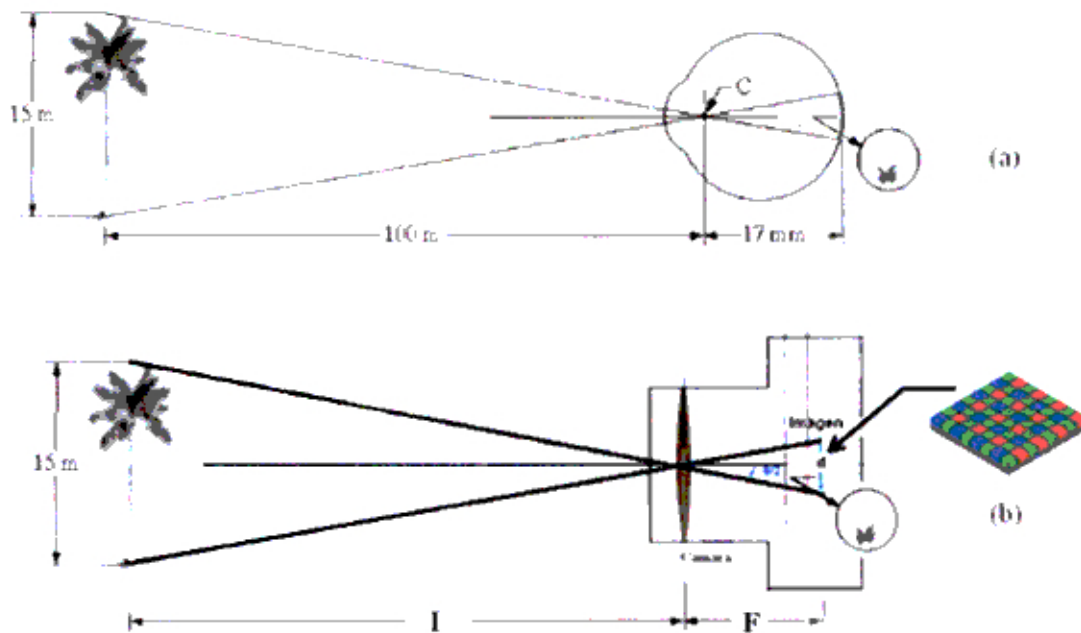


Figura 24. Comparación entre el ojo humano y una cámara digital.

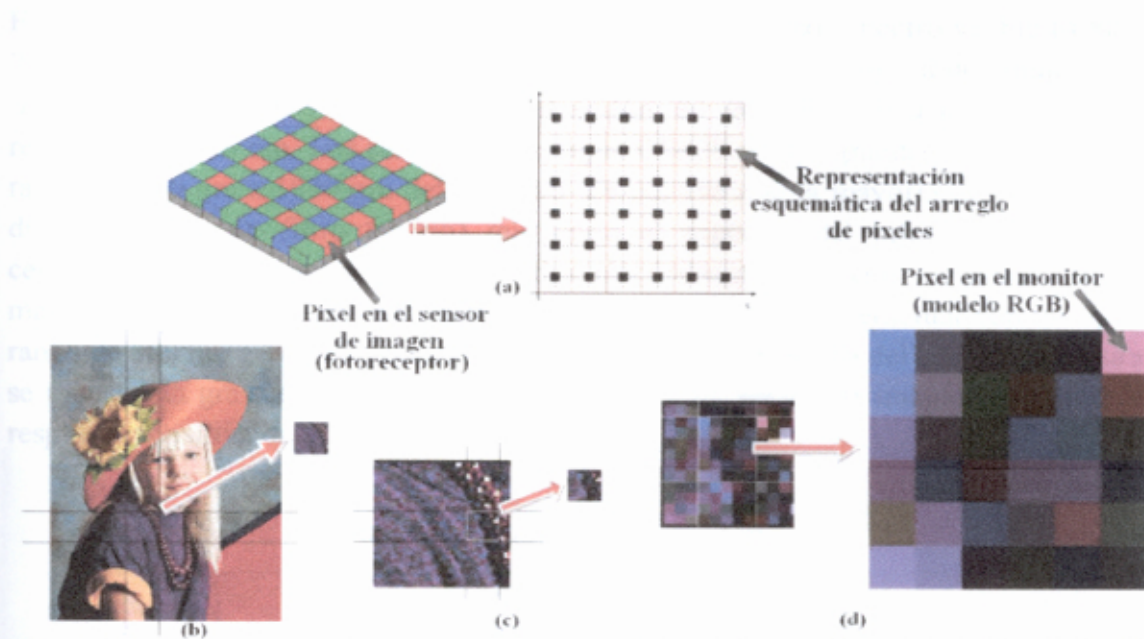


Figura 25. (a) El sensor de imagen como un arreglo de pixeles en el modelo RGB. En (b), (c) y (d) se realiza una ampliación de la fotografía para apreciar que la fotografía es un arreglo de pixeles en el modelo RGB.

En conclusión, un sistema de adquisición de imágenes consta de un sistema óptico, el juego de lentes, con el propósito de enfocar la imagen sobre el sensor de imagen; un sistema de conversión de señal óptica a señal digital, que en su mayoría consta de un sensor de imagen, un sistema de conversión Corriente – Voltaje (I/V), un sistema de corrección automático de ganancia (AGC) y un sistema de conversión de señal analógica a digital; el protocolo de comunicación, representado por el cable digital; y el registro del imagen que puede ser un tarjeta de memoria SD o el computador. El esquema se aprecia en la Figura 26.

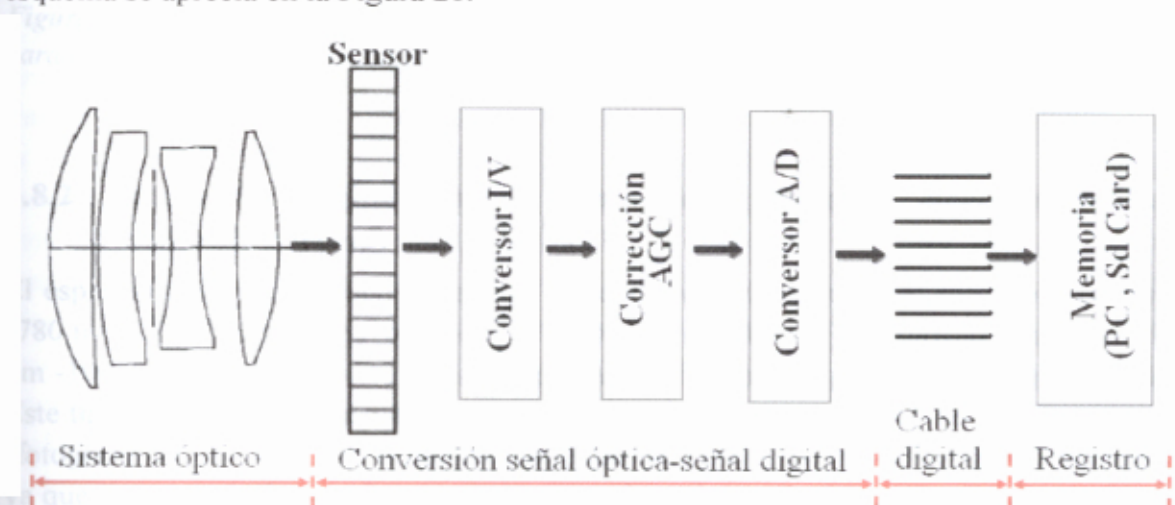


Figura 26. Sistema de adquisición de imágenes.

3.8.1 Fotografía digital en el rango del espectro electromagnético visible

El espectro electromagnético visible conocido también como espectro visible (400 nm - 700 nm). Es el único rango que nuestro ojo puede captar; por eso, la denominación del 'rango visible'. Como se mencionó, el sensor de imagen es una réplica o trata de replicar a nuestro ojo. Los sensores de imagen CMOS y CCD pueden reaccionar con un rango de 300 nm a 1000 nm del espectro. Es por eso que la mayoría de cámaras en su diseño incluye un filtro (vidrio) que corta el espectro del infrarrojo cercano (IR cercano). Es decir, no deja pasar ondas electromagnéticas con longitudes de onda mayores a los 700 nm. De esta manera el sensor sólo puede interactuar con ondas en el rango de 300 nm a 700 nm; por tanto, emula el comportamiento del ojo. En la Figura 27 se muestra la gráfica de la respuesta sensitiva de un sensor de imagen y la gráfica de respuesta sensitiva del ojo humano.

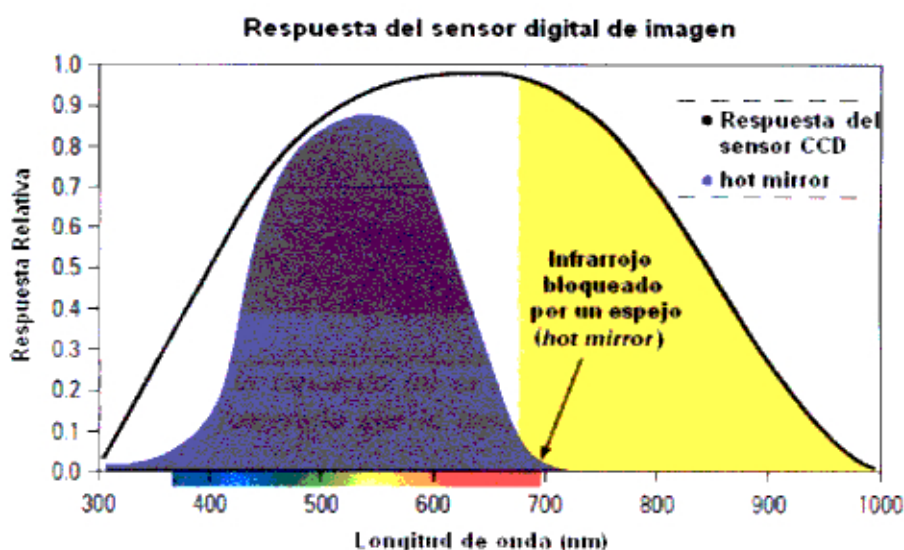


Figura 27. Gráfica respuesta sensitiva vs la longitud de onda del sensor de imagen electrónico para el Silicio y del ojo humano (color lila) [35].

3.8.2 Fotografía digital en el rango del espectro electromagnético infrarrojo cercano

El espectro electromagnético infrarrojo se subdivide en tres rangos: infrarrojo cercano (780 nm - 1100 nm), infrarrojo medio (1000 nm - 15000 nm), infrarrojo lejano (15000 nm - 100000 nm) [47]. En esta tesis se trabaja con fotografías para el infrarrojo cercano. Este tipo de fotografía consiste en registrar imágenes con el espectro infrarrojo cercano (fotografía IR cercano). No debemos confundir esta técnica con las fotografías térmicas; ya que, ese tipo de fotografía trabaja con el infrarrojo medio. Estas fotografías registran de qué manera el espectro es reflejado o absorbido por las superficies. No se debe

pensar que las fotografías IR cercano nos da información de la temperatura del cuerpo retratado, este es el caso de la fotografía térmica que no es estudio de esta tesis.

Algunas características importantes (observar las diferencias entre la fotografía visible e IR cercano) que presenta este tipo de fotografía:

- Mayor contraste entre las nubes y el cielo que la fotografía visible.
- Mayor claridad en la sombra.
- El mar, los lagos, los ríos y los terrenos áridos se observan oscuros.
- Las zonas de vegetación se presentan más claros.

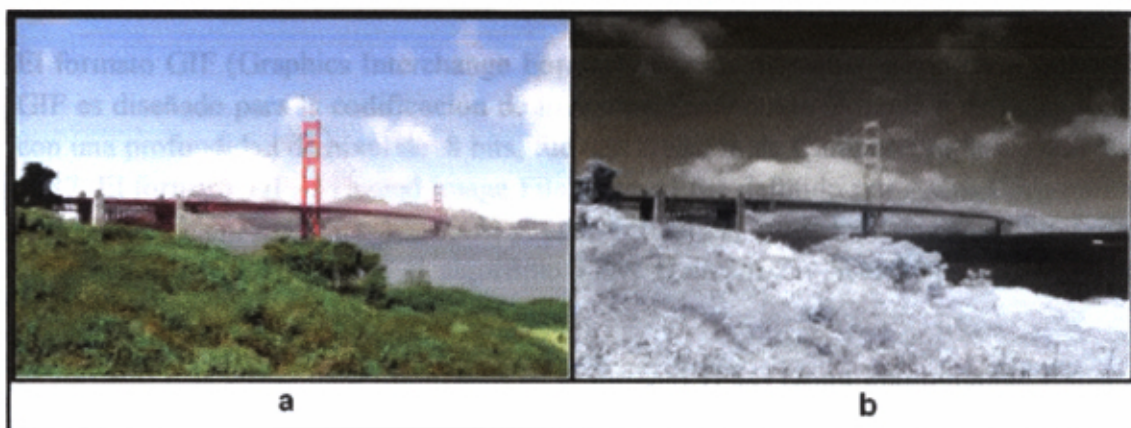


Figura 28. La imagen de la izquierda (a) es una fotografía del espectro visible y la de la derecha (b) es la misma fotografía que la izquierda pero tomada en el espectro infrarrojo cercano [35].

3.9 Formatos de compresión de archivos de imágenes digitales

Un algoritmo general para comprensión y reconstrucción de imagen es mostrado en el diagrama de bloques de la Figura 29. El primer paso es remover la información redundante causada por la correlación de los datos de imagen. Luego, se codifica el dato transformado usando un código de longitud variable o longitud fija, longitud se refiere a la cantidad de bits por pixel. El código con longitud fija proporciona un rápido procesamiento. El código con longitud variable produce un menor almacenamiento de datos. Los datos codificados constituyen el archivo comprimido, luego estos pueden ser transmitidos y archivados. Para la observación, la imagen se decodifica para finalmente obtener la imagen digitalizada nuevamente. Un dato redundante se puede perder en un proceso de compresión de un archivo de imagen. Existe una gran variedad de algoritmos para la codificación, compresión, de un archivo de imagen que reduce el tamaño de archivo. El más conocido es la codificación **Huffman**, el cual proporciona una codificación óptima y ningún error de decodificación. La idea principal de la codificación Huffman es representar los datos por códigos de longitudes variables, los de mayor frecuencia serán representados por códigos cortos.



Figura 29. Diagrama de bloques del algoritmo básico para la compresión de archivos.

El formato GIF (Graphics Interchange Format) es frecuentemente usado en el internet. GIF es diseñado para la codificación de imágenes llevándolos al modelo de color RGB con una profundidad de píxel de 8 bits, fue una creación de CompuServe, Inc. en el año 1987. El formato TIFF (Tagged Image File Format) fue definido por Aldus Corporation en 1986, también, usa el modelo RGB y, en la actualidad, otros modelos de color. Tanto el formato GIF y TIFF usan el algoritmo LZW (Lempel-Ziv-Welch) [38pp743,39 pp 50-51].

El formato más usado para fotografías es el formato JPEG (Joint Photographic Experts Group). Para imágenes (fotogramas) de video se desarrollo el formato MPEG (Motion Picture Experts Group).

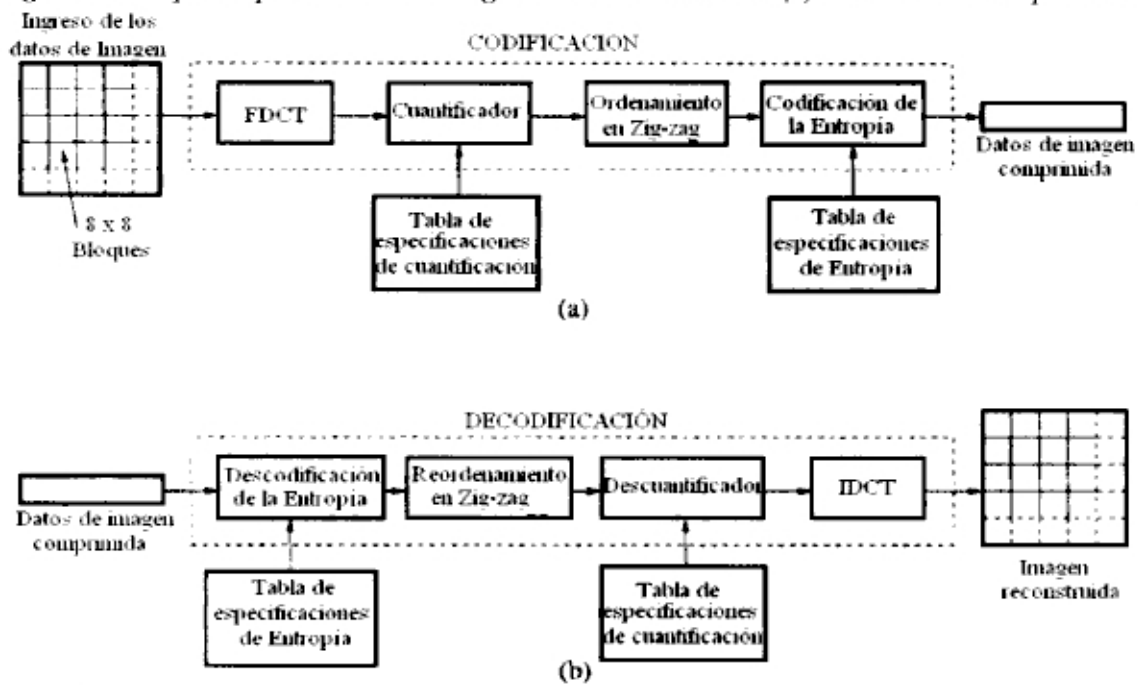
3.9.1 El formato JPEG

El estándar JPEG es internacionalmente normalizada por la norma ISO/IEC IS (International Standard) 10918-1: Digital Compression and Coding of continuous-tone still Images and also ITU-T Recommendation T.81. JPEG es definido por cuatro modos de operación:

1. Modo secuencial de menor perdida.- se comprime la imagen en un solo barrido y la imagen decodificada es una exacta replica de la imagen original.
2. Modo secuencial basado en la Transformada Discreta de Coseno (DCT).- se comprime la imagen en un solo barrido usando la técnica basada en la DCT.
3. Modo progresivo basado en la Transformada Discreta de Coseno (DCT).- se comprime la imagen en múltiples barridos y descomprime la imagen en múltiples barridos basado en la DCT.
4. Modo jerárquico.- se comprime la imagen en resoluciones para vistas en diferentes dispositivos.

El algoritmo JPEG que usa el modo secuencial basada en la DCT es denominado el algoritmo *baseline JPEG*, el cual está basado en basado en el código Huffman [39].

Figura 30. Esquema para realizar el algoritmo *baseline JPEG*. (a) Se muestra el esquema de



compresión y en (b) se muestra el esquema de descompresión [39].

El proceso de compresión JPEG trabaja con los píxeles representados en el modelo de color $Y C_{lum} C_{crom}$, por tal motivo, se realiza una transformación de un píxel RGB de 24 bits de profundidad a un píxel $Y C_{lum} C_{crom}$ de 24 bits de profundidad. Para lo cual se tiene la siguiente expresión para la codificación

$$\begin{pmatrix} Y \\ C_{lum} \\ C_{crom} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299000 & 0.58700 & 0.11400 \\ -0.16874 & -0.33126 & 0.50000 \\ 0.50000 & -0.41869 & -0.08131 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{pmatrix} \quad \dots (21)$$

Para la decodificación

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.0 & 0.0 & 1.40210 \\ 1.0 & -0.34414 & -0.71414 \\ 1.0 & 1.77180 & 0.0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ C_{lum} \\ C_{crom} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{pmatrix} \quad \dots (22)$$

Luego se resta a cada píxel 128 y se obtiene que los valores de píxeles pertenezcan al rango $[-128, 127]$. De esta manera, se obtiene que el centro del rango sea cero. Primero, para el tratamiento de codificación se toma bloques de 8×8 píxeles donde a cada elemento del bloque se aplica la transformada discreta de coseno.

$$f(x, y) = \begin{pmatrix} f(0,0) & f(1,0) & f(2,0) & f(3,0) & f(4,0) & f(5,0) & f(6,0) & f(7,0) \\ f(0,1) & f(1,1) & f(2,1) & f(3,1) & f(4,1) & f(5,1) & f(6,1) & f(7,1) \\ f(0,2) & f(1,2) & f(2,2) & f(3,2) & f(4,2) & f(5,2) & f(6,2) & f(7,2) \\ f(0,3) & f(1,3) & f(2,3) & f(3,3) & f(4,3) & f(5,3) & f(6,3) & f(7,3) \\ f(0,4) & f(1,4) & f(2,4) & f(3,4) & f(4,4) & f(5,4) & f(6,4) & f(7,4) \\ f(0,5) & f(1,5) & f(2,5) & f(3,5) & f(4,5) & f(5,5) & f(6,5) & f(7,5) \\ f(0,6) & f(1,6) & f(2,6) & f(3,6) & f(4,6) & f(5,6) & f(6,6) & f(7,6) \\ f(0,7) & f(1,7) & f(2,7) & f(3,7) & f(4,7) & f(5,7) & f(6,7) & f(7,7) \end{pmatrix} \dots (23)$$

Donde f puede ser un valor de Y , o C_b o C_r . Después, se aplica la transformada discreta de coseno, representa el bloque FDCT de la Figura 30a, a cada punto

$$F(u, v) = \frac{1}{4} C(u)C(v) \sum_{x=0}^7 \sum_{y=0}^7 f(x, y) \cos\left[\frac{\pi(2x+1)u}{16}\right] \cos\left[\frac{\pi(2y+1)v}{16}\right] \dots (24)$$

Para $u = 0, 1, \dots, 7$ y $v = 0, 1, \dots, 7$ donde $C(k) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} & \text{para } k = 0 \\ 1 & \text{otro valor de } k \end{cases} \dots (25)$

El elemento $F(0,0)$ se denota por DC y los demás elementos por $AC(u, v)$. Ahora se continúa con el cuantificador, para lo cual se utiliza los valores de cuantificación que se han desarrollado en base a los experimentos psicovisuales de Lohscheller luminosidad

$$C_{lum} = \begin{pmatrix} 16 & 11 & 10 & 16 & 24 & 40 & 51 & 61 \\ 12 & 12 & 14 & 19 & 26 & 58 & 60 & 55 \\ 14 & 13 & 16 & 24 & 40 & 57 & 69 & 56 \\ 14 & 17 & 22 & 29 & 51 & 87 & 80 & 62 \\ 18 & 22 & 37 & 56 & 68 & 109 & 103 & 77 \\ 24 & 35 & 55 & 64 & 81 & 104 & 113 & 92 \\ 49 & 64 & 78 & 87 & 103 & 121 & 120 & 101 \\ 72 & 92 & 95 & 98 & 112 & 100 & 103 & 99 \end{pmatrix} \dots (26)$$

$$C_{cromático} = \begin{pmatrix} 17 & 18 & 24 & 47 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 18 & 21 & 26 & 66 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 24 & 26 & 56 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 47 & 66 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \\ 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 & 99 \end{pmatrix} \dots (27)$$

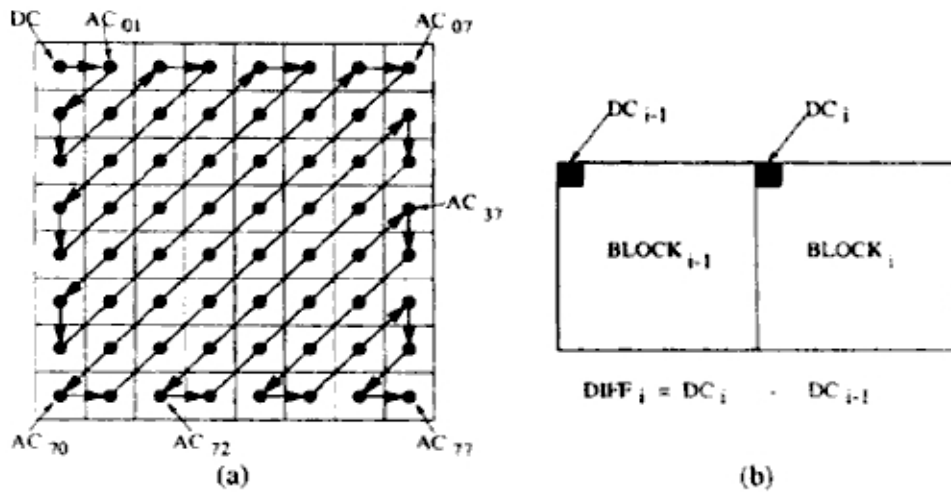


Figura 32. (a) Elementos AC para ordenamiento en Zig-zag. (b) DC de codificación por diferencia $DIFF_i = DC_i - DC_{i-1}$ [39].

A continuación, se muestra un ejemplo y se detalla el último paso de codificación de entropía. Sea el bloque de datos de 8x8 la componente Y de luminosidad o brillo

$$f(x,y) = \begin{pmatrix} 110 & 110 & 118 & 118 & 121 & 126 & 131 & 131 \\ 108 & 111 & 125 & 122 & 120 & 125 & 134 & 135 \\ 106 & 119 & 129 & 127 & 125 & 127 & 138 & 144 \\ 110 & 126 & 130 & 133 & 133 & 131 & 141 & 148 \\ 115 & 116 & 119 & 120 & 122 & 125 & 137 & 139 \\ 115 & 106 & 99 & 110 & 107 & 116 & 130 & 127 \\ 110 & 91 & 82 & 101 & 99 & 104 & 120 & 118 \\ 103 & 76 & 70 & 95 & 92 & 91 & 107 & 106 \end{pmatrix} \quad \dots(32)$$

Primer paso, se resta 128 a cada elemento para obtener los elementos en el rango [-128, 127]

$$f(x,y) = \begin{pmatrix} -18 & -18 & -10 & -10 & -7 & -2 & 3 & 3 \\ -20 & -17 & -3 & -6 & -8 & -3 & 6 & 7 \\ -22 & -9 & 1 & -1 & -3 & -1 & 10 & 16 \\ -18 & -2 & 2 & 5 & 5 & 3 & 13 & 20 \\ -13 & -12 & -9 & -8 & -6 & -3 & 9 & 11 \\ -13 & -22 & -29 & -18 & -21 & -12 & 2 & -1 \\ -18 & -37 & -46 & -27 & 29 & -24 & -8 & -10 \\ -25 & -52 & -58 & -33 & -36 & -37 & -21 & -22 \end{pmatrix} \quad \dots(33)$$

Se sigue aplicando la transformada discreta de coseno.

$$F(u, v) = \begin{pmatrix} -89.00 & -63.47 & 18.21 & -6.85 & 7.50 & 13.45 & -7.00 & 0.13 \\ 74.14 & -2.90 & -19.93 & -21.04 & -17.88 & -10.81 & 8.29 & 5.26 \\ -63.65 & 3.10 & 5.08 & 14.82 & 10.12 & 9.33 & 1.31 & -0.62 \\ 3.73 & 2.85 & 6.67 & 8.99 & -3.38 & 1.54 & 1.04 & -0.62 \\ 2.50 & 0.57 & -4.46 & 0.52 & 3.00 & -2.89 & -0.32 & 1.33 \\ 7.52 & -1.80 & -0.63 & -0.10 & 0.41 & -3.21 & -2.74 & -2.07 \\ -3.40 & 0.43 & 0.81 & 0.28 & -0.40 & -0.19 & -0.58 & -1.09 \\ -2.26 & -0.88 & 1.73 & 0.23 & -0.21 & -0.12 & 1.23 & 1.61 \end{pmatrix} \quad \dots(34)$$

Luego, se utiliza los coeficientes de cuantización para luminosidad Y .

$$F_c(u, v) = \text{Redondear} \left(\frac{F(u, v)}{C_{lum}(u, v)} \right) = \begin{pmatrix} -6 & -6 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \dots(35)$$

Entonces $DC = -6$ y ordenando en Zig-zag

$$AC(1,0) \dots AC(7,7) = -6 \ 6 \ -5 \ 0 \ 2 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \quad \dots(36)$$

46 ceros

Considerando que el anterior DC tiene un valor de -4

$$DIFF = DC - DC_{anterior} = -2 \quad \dots(37)$$

Ahora, debemos codificar $-2 \ -6 \ 6 \ -5 \ 0 \ 2 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0$ según 46 ceros

el cifrado de entropía. Para el cifrado de $DIFF = -2$, el valor de error de predicción -2 pertenece a la categoría 2. Según, la Tabla K.3 (Diferencias de coeficientes DC para luminosidad) del Anexo K de [48]. El código que le corresponde es 011. Además se usa el concepto de *entero de longitud variable* (VLI) que dice que el número se representa en con su valor binario y el negativo de este mismo como su complemento. El valor de 2 en base 2 de representa por 10 y el valor de -2 se representa como el complemento de $\overline{10} = 01$.

$$\text{Cifrado}(DIFF) = (\text{Código Huffman})(VLI) = 011\overline{10} = 01101$$

Para codificar la secuencia AC se utiliza dos símbolos $(RUNLENGTH, CATEGORY)(AMPLITUD)$. Donde $RUNLENGTH$ es el número de ceros consecutivos antes del coeficiente AC diferente de cero, $CATEGORY$ es el número de bits que representa el código VLI, y $AMPLITUD$ es el cifrado VLI el coeficiente AC diferente de cero. Además, el símbolo $(0,0)$ indica que los términos restantes en ordenamiento en Zig-zag son ceros y el símbolo $(15,0)$ representa 16 ceros. También es necesario que $RUNLENGTH$ sea menor que 16. Como ejemplo, de (36) observamos que 2 esta precedido por un cero y 2 se puede representar por 2 bits y su representación en código binario es 10. Por tanto $RUNLENGTH = 0$, $CATEGORY = 2$ y $AMPLITUD = 2$. Entonces, 02 se representa por $(1,2)(2)$. Luego, completando toda la secuencia (36)

$$AC(1,0) \dots AC(7,7) = \underbrace{-6}_{(0,3)(-6)} \underbrace{6}_{(0,3)(6)} \underbrace{-5}_{(0,3)(-5)} \underbrace{0\ 2\ 0}_{(1,2)(2)} \underbrace{-1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0}_{(1,1)(-1)} \underbrace{-10\ 0\ -1}_{(5,1)(-1)} \underbrace{1\ 000}_{(2,1)(-1)} \dots \underbrace{0}_{(0,0)}$$

Cada símbolo $(RUNLENGTH, CATEGORY)$ tiene su cifrado Huffman para coeficientes AC y se puede tomar de la Tabla K.5 para la luminosidad del Anexo K de [49].

	$(0,3) = 100$	$(1,2) = 11011$
Para el ejemplo	$(1,1) = 1100$	$(5,1) = 1111010$
	$(2,1) = 11100$	$(0,1) = 00$
	$(0,0) = 1010$	

	$(-6) = \overline{110} = 001$	$(6) = 110$
Y los valores VLI usados	$(-5) = \overline{101} = 010$	$(2) = 10$
	$(-1) = \overline{1} = 0$	$(1) = 1$

Por tanto,

$$Cifrado(AC(1,0) \dots AC(7,7)) = \underbrace{100001}_{(0,3)(-6)} \underbrace{100110}_{(0,3)(6)} \underbrace{100010}_{(0,3)(-5)} \underbrace{1101110}_{(1,2)(2)} \underbrace{11000}_{(1,1)(-1)} \underbrace{11110100}_{(5,1)(-1)} \underbrace{111000}_{(2,1)(-1)} \underbrace{0011010}_{(0,0)}$$

Finalmente,

$$Cifrado(f(x, y)) = Cifrado(DIFF)Cifrado(AC(1,0) \dots AC(7,7))$$

$$Cifrado(f(x, y)) = 0110110000100110100010110111011000111101001110000011010$$

Del resultado, la muestra de imagen en su componente de luminosidad está compuesta por 8x8 pixeles y cada pixel está compuesto de 8 bits. Por tanto, $f(x, y)$ está compuesto 512 bits. Sin embargo, la compresión está compuesta por 52 bits. En conclusión para el ejemplo, el tamaño de la muestra se ha reducido aproximadamente a su décima parte. En la decodificación se realiza todas las etapas de manera inversa y se sigue el esquema de la Figura 30b.

3.10 Protocolos de Comunicación

3.10.1 Protocolo de comunicación UART

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) – transmisor/receptor asíncrono universal es una de las formas más comunes de intercambiar los datos entre un ordenador y los periféricos. Etimológicamente la palabra “asíncrono” significa “sin reloj”, es decir que no hay ninguna señal que maneje los tiempos en que los datos deben leerse o indiquen que están disponibles para su lectura. En esta forma asíncrona de transmitir y recibir información binaria, se dispone de una línea especial para la recepción de datos (Dx) y otra asignada para la transmisión de datos (Tx). Cada bit se representa por un estado Alto o Bajo de la línea de transmisión durante un tiempo predeterminado, con tiempos perfectamente definidos y acordados de antemano ya que de otra forma no habría manera de poner de acuerdo al emisor y al receptor en cuanto a cuando está disponible cada bit para su lectura. En el protocolo de comunicación asíncrono RS-232-C, la velocidad de transmisión (bps, bits por segundo) a la que se realiza la transferencia se debe efectuar a un valor normalizado: 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, etc. En esta forma de comunicación serie, cada palabra de información o dato se envía independientemente de los demás. Suele constar de 8 ó 9 bits y van precedidos por un bit de START (inicio) y detrás de ellos se coloca un bit de STOP (parada), de acuerdo con las normas del formato estándar NRZ (Non Return – to - Zero). Los bits se transfieren a una frecuencia fija y normalizada. En la Figura 33, se muestra un esquemático del modo del protocolo de comunicación asíncrono.

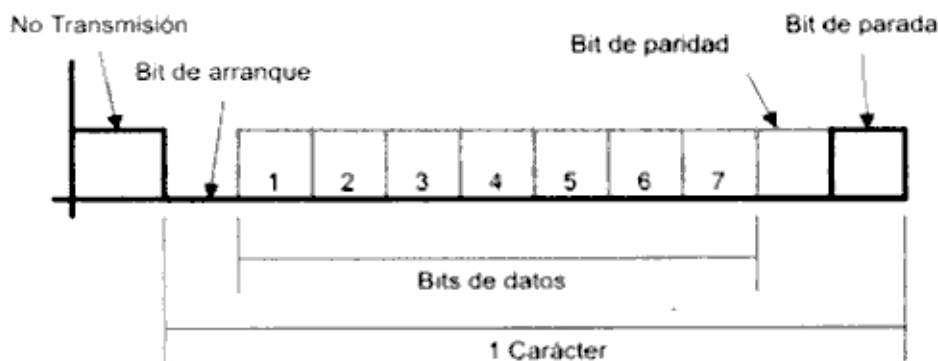


Figura 33. En el protocolo de comunicación asíncrona, cada dato consta de 8 ó 9 bits, estando precedidos por un bit de INICIO y les sigue un bit de PARADA. Los bits se transmiten al ritmo de la frecuencia, en Baudios.

De esta forma cuando decimos que una comunicación RS-232 es a 8 bits y a 9600 bps, se entiende que se va a recibir o transmitir 8 estados consecutivos de la línea de transmisión, separados cada uno de ellos $1/9600$ segundos, o su equivalente 104 microsegundos; es decir, si se quiere transmitir un 0 se debe dejar la línea al valor 0 durante 104 μ s. Si estuviera recibiendo un 0 y luego de 50 μ s la línea cambiase a 1, entonces se obtendría un error. A 19200 bps el ‘tiempo’ de cada bit será la mitad, 52 μ s.

3.10.2 Protocolo de comunicación SPI

SPI (Serial Peripheral Interface) permite transferencia de datos de 8 bits en serie, que pueden ser transmitidos y recibidos de forma síncrona y simultánea. El término síncrona se refiere a la existencia de una señal de reloj común para los sistemas digitales que se interconectan. Esta forma de comunicación es muy utilizada para conectar periféricos como convertidores digitales de señales, convertidores Analógicos/Digitales, memorias, entre otros. SPI establece el uso de 4 señales, cada una de ellas con su identificador y función específica:

- **SCK (Serial Clock):** Es la señal de reloj; se utiliza para sincronizar el intercambio de datos entre los dispositivos que se están comunicando. El maestro es el único que puede generar esta señal.
- **MOSI (Master Output Slave Input):** Flujo de bits que el maestro transmite al esclavo por una línea **SDO** (Serial Data Out).
- **MISO (Master Input Slave Output):** Flujo de bits que el maestro recibe del esclavo por una la línea **SDI** (Serial Data In).
- **SS (Slave Select):** Entrada de selección del esclavo, en los maestros esta señal se utiliza para el control y manejo de errores en sistemas con más de un maestro.

Si, por ejemplo, actuase como maestro un microcontrolador y como esclavo un chip de memoria RAM de 256 x 8bits de tamaño, la comunicación SPI la iniciaría el maestro enviando por la línea **SDO** un byte con la dirección de la memoria a acceder, seguido de otro byte que especificaría la operación (lectura/escritura) y un tercero que contendría el dato a escribir en caso de que se tratase de una operación de escritura. En el caso de que se tratase de una lectura, el maestro, después de enviar los 2 bytes iniciales, quedaría a la espera del byte que transmitiría el esclavo por su línea **SDO** y que se transmitiría al maestro por su línea **SDI**. En la Figura 34 se muestra las cuatro líneas de comunicación del modo SPI.

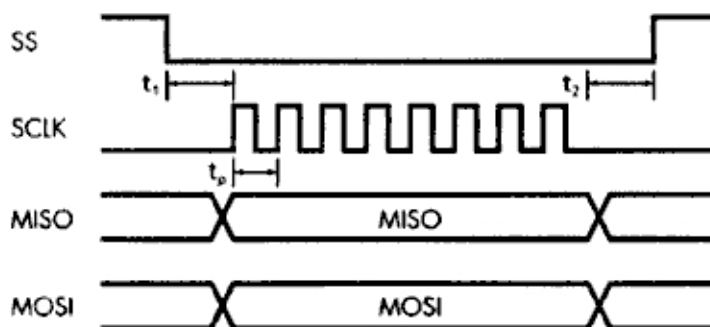


Figura 34. t_1 es el tiempo entre la elección del modo esclavo hasta la primera señal de reloj, t_2 es el tiempo entre la última señal de reloj hasta el abandono del modo esclavo y t_p es el periodo de la señal de reloj.

3.11 Cálculo de la región fotografiada por el nanosatélite CHASQUI-I

El nanosatélite Chasqui-I está orbitando alrededor de la Tierra a unos 350 Km de altura aproximadamente. Ahora, se calcula el área fotografiada por el sistema de adquisición de imágenes del nanosatélite Chasqui-I. Para el cálculo del área de la superficie fotografiada por el subsistema SIMA se considera la Tierra como una esfera de radio (a) con un valor de $6.371 \times 10^6 m$. La superficie S fotografiada por nanosatélite Chasqui-I se muestra en la Figura 35.

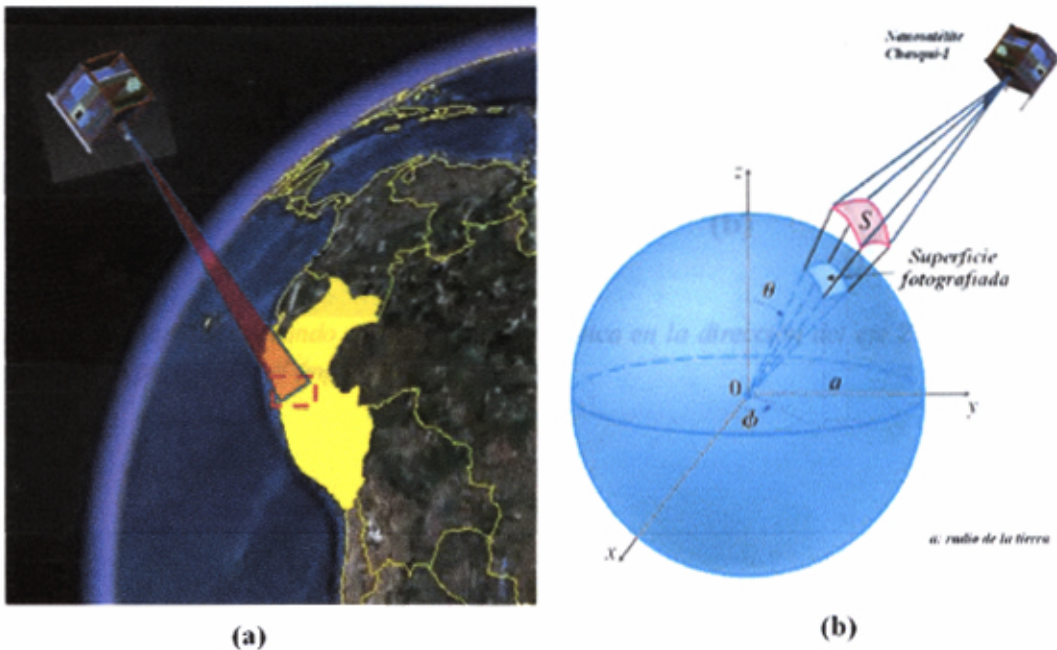


Figura 35. (a) El nanosatélite Chasqui-I fotografiando la Tierra. (b) Sistema coordenado esférico utilizado para calcular el área fotografiada por el nanosatélite Chasqui-I, área representada por S y a representa el radio de la tierra.

Para cuestiones de cálculo se considera que el cubesat se encuentra en el eje Z , tal como se observa en la Figura 36a. También, se observa h que representa la altura del nanosatélite con respecto de la tierra. La posición del nanosatélite se representa por C y el centro de la Tierra por O . El campo de visión de la cámara se definirá por el ángulo de visión diagonal de la cámara, el cual es representado por 2α en el esquema de la Figura 36b. Entonces, para el cálculo del área se define el rombo $PCRO$ donde el objetivo es hallar el ángulo 2θ ($\angle POR$), en el cual el ángulo $\angle PCR$ es igual 2α , los lados \overline{PO} y \overline{OR} son iguales al radio de la Tierra (a) y \overline{CO} es igual a $h+a$. La $\tan(\alpha)$ se obtiene del triángulo rectángulo \overline{CQR}

$$\tan(\alpha) = \frac{\overline{RQ}}{\overline{QC}} = \frac{\overline{RQ}}{\overline{OC} - \overline{QO}} \quad \dots(38)$$

Además del triángulo rectángulo \overline{RQO}

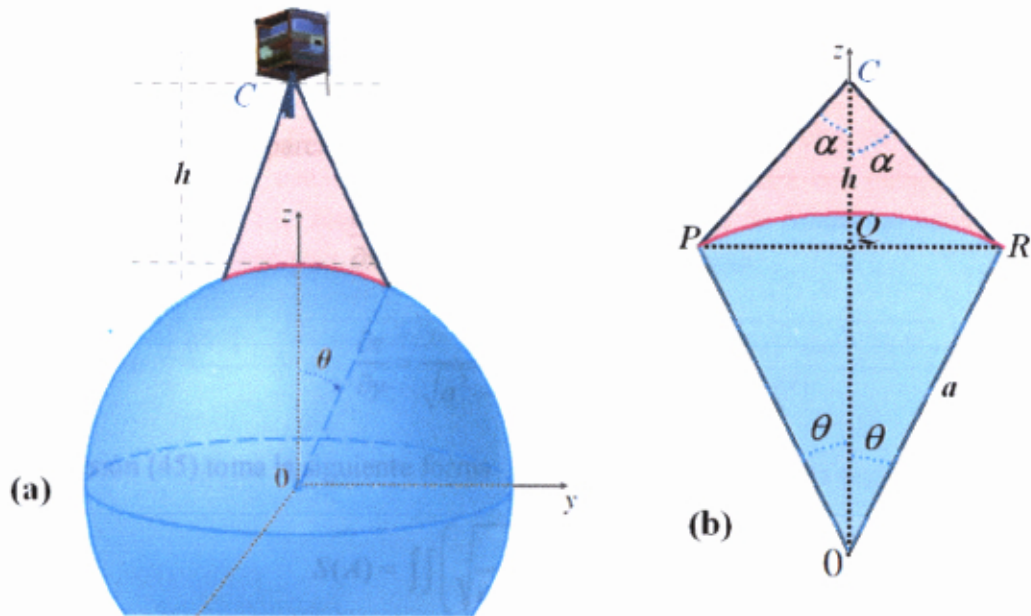


Figura 36. (a) Considerando que el Chasqui se ubica en la dirección del eje Z. (b) Esquema geométrico para hallar el ángulo θ .

$$\overline{RQ} = a \sin(\theta) \quad \dots(39)$$

$$\overline{QO} = a \cos(\theta) \quad \dots(40)$$

Reemplazando el valor de \overline{CO} del dato, y \overline{QO} y \overline{RQ} del valor obtenido en (22) y (41) en la expresión (21)

$$\tan(\alpha) = \frac{a \sin(\theta)}{h + a - a \cos(\theta)} \quad \dots(42)$$

Resolviendo,

$$\theta = 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{a \pm \sqrt{a^2 + a^2 \tan^2(\alpha) - (h+a)^2 \tan^2(\alpha)}}{(h+a) \tan(\alpha) + a \tan(\alpha)} \right), \quad 0^\circ < \theta < 90^\circ \quad \dots(43)$$

El cálculo de la superficie fotografiada se realiza en base al sistema coordenado cartesiano mostrado en la Figura 36. Entonces, la fotografía adquirida es parte de la superficie esférica. Se define el área $S(A)$ donde el

$$S(A) = \{(x, y, z) / z = \sqrt{a^2 - y^2 - x^2} \wedge -m < x < m \wedge -n < y < n, n, m : \text{cte positivas}\} \dots(44)$$

Entonces, la superficie se calcula según

$$S(A) = \iint \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \right) dA \quad \dots(45)$$

Hallando las derivadas parciales

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{-x}{\sqrt{a^2 - x^2 - y^2}} \quad \dots(46)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{-y}{\sqrt{a^2 - x^2 - y^2}} \quad \dots(47)$$

La expresión (45) toma la siguiente forma

$$S(A) = \iint \left(\sqrt{\frac{a^2}{a^2 - x^2 - y^2}} \right) dydx \quad \dots(48)$$

$$S(A) = a \int_{-m}^m \int_{-n}^n \left(\frac{1}{\sqrt{a^2 - x^2 - y^2}} \right) dydx \quad \dots(49)$$

Los lados de la fotografía están en relación de 3 a 4. Por tanto

$$\frac{m}{3} = \frac{n}{4} = \frac{(d/2)}{5} \quad \dots(50)$$

Además

$$d = a \times \sin(\theta) \quad \dots(51)$$

Los valores de

$$m = 0.6 \times a \times \sin(\theta), \quad n = 0.8 \times a \times \sin(\theta) \quad \dots(52)$$

Por tanto, se calcula el área de la superficie de la siguiente expresión

$$S(A) = a \int_{-0.6 \times a \times \sin(\theta)}^{0.6 \times a \times \sin(\theta)} \int_{-0.8 \times a \times \sin(\theta)}^{0.8 \times a \times \sin(\theta)} \left(\frac{1}{\sqrt{a^2 - x^2 - y^2}} \right) dydx \quad \dots(53)$$

Donde

$$\theta = 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{a - \sqrt{a^2 + a^2 \tan^2(\alpha) - (h+a)^2 \tan^2(\alpha)}}{(h+a) \tan(\alpha) + a \tan(\alpha)} \right) \quad \dots (53)$$

Y a es el radio de la tierra y α es el ángulo de vista diagonal y h la altura del nanosatélite Chasqui-I con respecto a la tierra. Para una cámara con campo de vista diagonal FOV de 41° , se tiene $41^\circ = 2\alpha$; además, la altura de órbita del nanosatélite Chasqui-I es de 350 km. Entonces, el valor de θ se halla según

$$\theta = 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{6371 - \sqrt{6371^2 + 6371^2 \tan^2(20.5^\circ) - (350 + 6371)^2 \tan^2(20.5^\circ)}}{(350 + 6371) \tan(20.5^\circ) + 6371 \tan(20.5^\circ)} \right) \quad \dots (54)$$

Y se obtiene $\theta = 1.18^\circ$. Por tanto, la superficie fotografiada se calcula según

$$S(A) = 6371 \int_{-0.6 \cdot 6371 \cdot \sin(1.18^\circ)}^{0.6 \cdot 6371 \cdot \sin(1.18^\circ)} \int_{-0.8 \cdot 6371 \cdot \sin(1.18^\circ)}^{0.8 \cdot 6371 \cdot \sin(1.18^\circ)} \left(\frac{1}{\sqrt{6371^2 - x^2 - y^2}} \right) dy dx \quad \dots (55)$$

Donde se halla que $S(A) = 33182 \text{ km}^2$.

Para una fotografía de resolución de 640×480 pixeles se tiene 0.108 km/pixel. Si el campo de vista diagonal es de 109° ; entonces, el valor de θ

$$\theta = 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{6371 - \sqrt{6371^2 + 6371^2 \tan^2(54.5^\circ) - (350 + 6371)^2 \tan^2(54.5^\circ)}}{(350 + 6371) \tan(54.5^\circ) + 6371 \tan(54.5^\circ)} \right) \quad \dots (56)$$

Y se obtiene $\theta = 4.69^\circ$. Por tanto, la superficie fotografiada se calcula según

$$S(A) = 6371 \int_{-0.6 \cdot 6371 \cdot \sin(4.69^\circ)}^{0.6 \cdot 6371 \cdot \sin(4.69^\circ)} \int_{-0.8 \cdot 6371 \cdot \sin(4.69^\circ)}^{0.8 \cdot 6371 \cdot \sin(4.69^\circ)} \left(\frac{1}{\sqrt{6371^2 - x^2 - y^2}} \right) dy dx \quad \dots (57)$$

Donde se halla que $S(A) = 576836.27 \text{ km}^2$. Entonces, para una fotografía de resolución de 640×480 pixeles se tiene 1.878 km/pixel.

Por tanto, si el nanosatélite Chasqui-I órbita a 350 km de altura y fotografía imágenes con una resolución de 640×480 pixeles; entonces, se obtiene el área que cubre un pixel de la fotografía adquirida:

- Para una cámara con FOV = 41° se barre 0.108 km/pixel.
- Para una cámara con FOV = 109° se barre 1.878 km/pixel.

4 Planteamiento del Problema

El proyecto, como se explicó en la introducción, tuvo como objetivo obtener imágenes de la tierra, adquiridas por el nanosatélite Chasqui-I en órbita, y transmitir las hacia tierra. Para llegar a cumplir este objetivo existen varias interrogantes por contestar: por ejemplo, ¿cómo poner en órbita al cubesat? ¿Cuál es el tipo de estructura que debe tener para soportar las condiciones de órbita a 300 km de altura aproximadamente? ¿Cuáles son las condiciones del ambiente a 300 km de altura? ¿Qué protocolo de comunicación se debe usar? ¿Cómo se realiza la captura de la imagen y dónde se almacena? ¿Cómo se sabe si la cámara está enfocando la superficie terrestre, y si no enfoca cómo la orientamos para enfocar al planeta tierra? Todas las anteriores preguntas deben ser contestadas, y además plantear y contestar algunas otras interrogantes que se mostraron durante el desarrollo, para poder cumplir con el objetivo del Chasqui-I. Expuestas las dudas para cumplir con el objetivo del cubesat, se noto que existen diversos temas de la ingeniería por trabajar; por tal motivo, se dividió el nanosatélite Chasqui-I en subsistemas. Cada subsistema desarrollo un objetivo específico. A continuación, se detalla los objetivos de cada subsistema:

- EMEC tiene el objetivo de la revisión del estado de arte, análisis comparativo de los casos existentes para el diseño del pico-satélite y la fabricación de un modelo de estructura basado en el Estándar Cubesat.
- SIMA obtener imágenes de la tierra desde el Chasqui-I.
- CCMI gestiona y monitorea la información entre los subsistemas del Chasqui-I, PCT, SICOM, SIMA y SDCA.
- PCT debe asegurar el abastecimiento de energía eléctrica al cubesat.
- SICOM es el responsable de establecer la comunicación entre el cubesat y la estación terrena (módulo ESTER)
- SDCA debe dar la solución para una orientación deseada del Chasqui-I cuando está sea necesaria.

Diagrama de Bloques CHASQUI I

Jefe de proyecto: Lic. Hector Bedon, MSc.

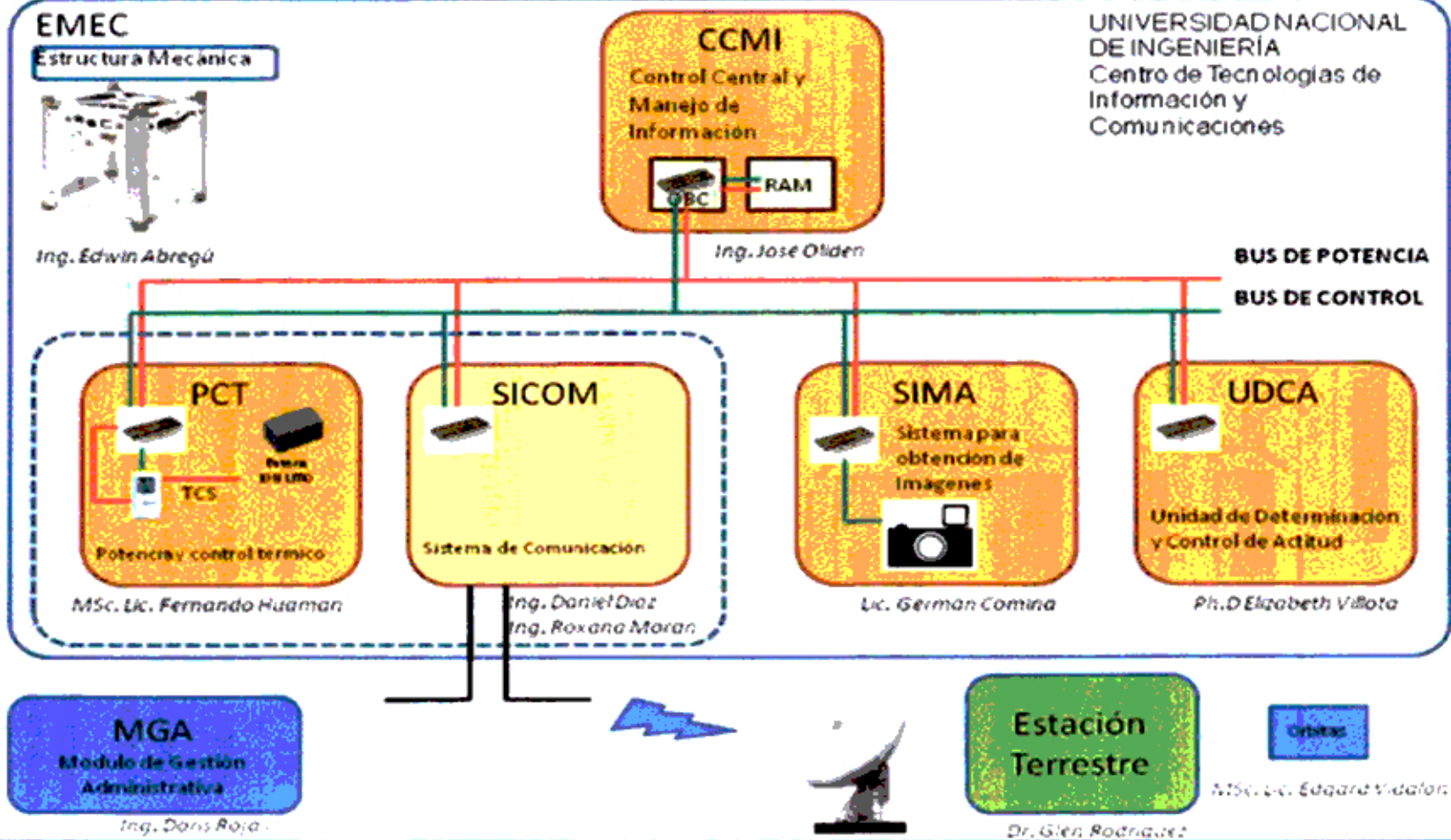


Figura 37. Diagrama de Bloques de los subsistemas del nanosatélite Chasqui-I.

Durante el desarrollo del proyecto, se designaron grupos de trabajo con el nombre de **módulo**. Cada módulo se encargaba de diseñar e implementar un subsistema. El nombre del módulo se designó tal cual el nombre del subsistema. Adicional a esto se designaron otros módulos que no se encargaban de construir ningún subsistema:

- ESTER no es parte del satélite pero es el módulo responsable de los equipos (radios) necesarios para comunicarse con el Chasqui-I.
- SORAT es el encargado de simular las orbitas posibles del Chasqui-I.
- MIP debe ensamblar los componentes y realizar las pruebas de campo al cubesat.

A continuación, el esquema que se utilizó para el diseño e implementación de todos los subsistemas del nanosatélite Chasqui-I.

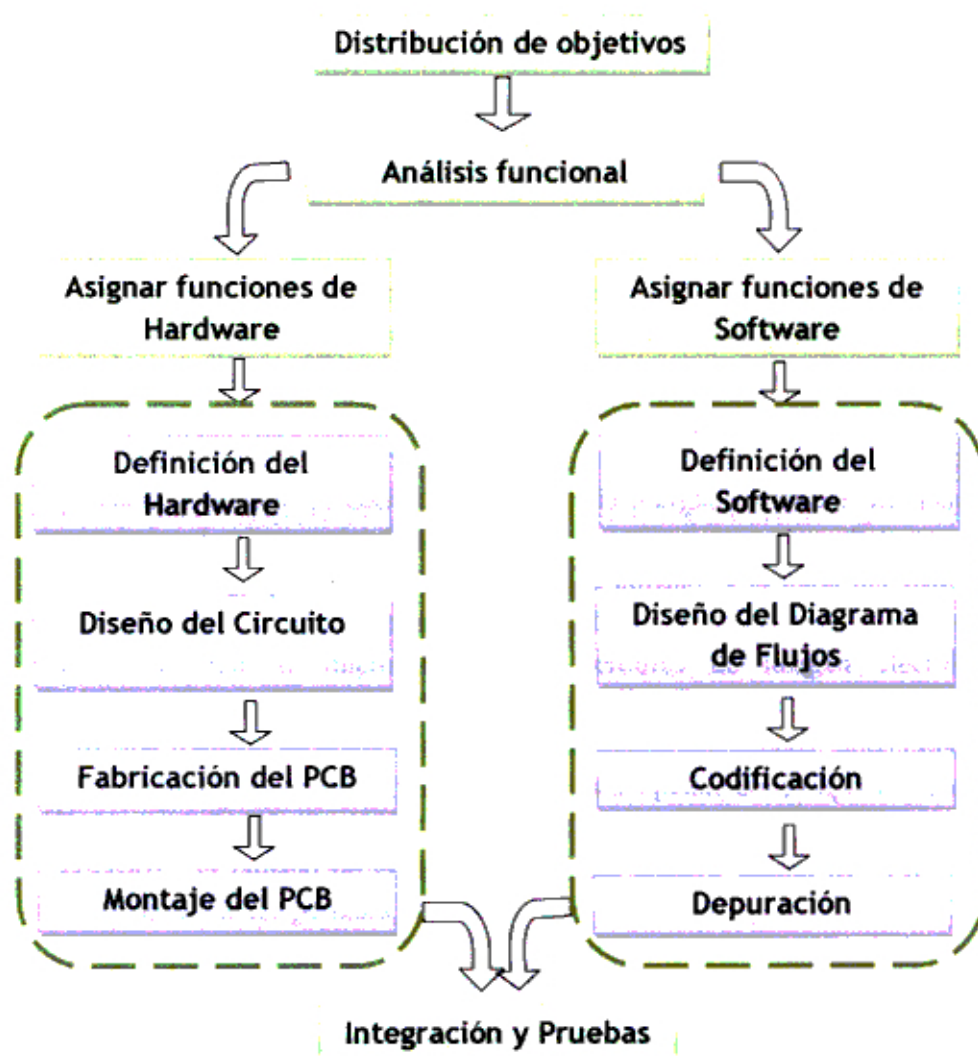


Figura 38. Diagrama de bloques para el trabajo de un subsistema del nanosatélite Chasqui-I.

El diseño del subsistema se desarrollo según el diagrama de bloques mostrada en la Figura 38, se divide en cinco etapas:

- 1. Distribución de objetivos.** Es la etapa de definición del objetivo que se asigna a cada subsistema. Se debe responder a la pregunta ¿Qué debe lograr el sistema?
- 2. Análisis funcional.** Es la etapa en la cual se plantea la forma de conseguir el objetivo. La cuestión a resolver es ¿Cómo se consigue el objetivo? Por ejemplo, en esta tesis se desea adquirir imágenes digitales del nanosatélite Chasqui-I; entonces, se necesita un sistema de adquisición de imágenes digital para el nanosatélite Chasqui-I. De la Figura 26, se puede realizar cuatro para conseguir el sistema de adquisición de imágenes: ¿Qué tipo de sistema óptico se va utilizar?, ¿cuál es el tipo de sensor electrónico de imagen comercial más apropiado, CCD o CMOS?, ¿qué protocolo de comunicación se va a utilizar para el almacenamiento del archivo digital?, y ¿cuál es la memoria más apropiada para el almacenamiento del archivo digital, EEPROM o Sd Card. Esta es la etapa de estudio del problema. Se diría que es el fundamento teórico de esta tesis.
- 3. Asignación de funciones.** Esta etapa enfoca el desarrollo del hardware y software. Luego realizar un análisis funcional, se realiza la elección de la solución. Aquí, se debe tener en cuenta los requerimientos y limitaciones que tiene el diseño. Para la realización del diseño tenemos que considerar que el cubesat estará orbitando a 300 km de altura sobre el nivel del mar aproximadamente; entonces, se infiere que el Chasqui-I no tiene una fuente de corriente eléctrica que podría alimentar en todo momento y proporcionar cuanta potencia se le pida. Es decir, el suministro de energía eléctrica es limitado. Por otro lado, el volumen del Chasqui-I no debe ser mayor a 1L y el peso no debe exceder a 1 kg, que es una limitante para el tamaño y la masa del sistema de adquisición de imágenes respectivamente. Todo se trabajará de manera digital con operación de microcontroladores sensores de imagen electrónicos, memorias como la EEPROM o las tarjetas SD Card. Por otro lado, se debe procurar registrar archivos de imagen en formatos que ocupen poco espacio de almacenamiento; es decir, debemos dar una opción de compresión de los archivos digitales. Por tanto, se tiene como limitantes: la masa, el consumo eléctrico, el tamaño de almacenamiento del archivo digital de imagen y las condiciones de temperatura y presión.

4. Diseño e implementación del hardware y software

El desarrollo de hardware involucra el desarrollo del software y viceversa, sin embargo, estos se pueden desarrollar en forma paralela. Esta es la etapa que involucra mayor desarrollo. El diseño e implementación del hardware se realiza en cuatro etapas:

- **Definición.**- se selecciona los componentes electrónicos comerciales, para lo cual se tiene en cuenta sus especificaciones técnicas y el costo de estos adicionalmente a todas las restricciones planteadas en la etapa de asignación de funciones.
- **Diseño del circuito.**- este proceso ocurre cuando las funciones del subsistema están bien definidas y las soluciones técnicas están descuidadas. Entonces, viene la elección del tipo de microcontrolador, capacitor, resistencia, regulador de voltaje, multiplexor, etc. Además, las líneas de comunicación y potencia están definidas. Entonces, se procede a realizar un diagrama esquemático del circuito eléctrico.
- **Fabricación del PCB.**- PCB es el acrónimo en inglés de Printed Circuit Board; es decir, Tarjeta de circuito impreso. En esta etapa se procede a llevar el diseño esquemático del circuito eléctrico a un diseño de impresión utilizando una software de diseño como el ORCAD o el EAGLE. Se genera un archivo que genera el PCB del subsistema.
- **Montaje del PCB.**- se procede a soldar los componentes electrónicos al PCB.

El diseño e implementación del software también se realiza en cuatro etapas:

- **Definición.**- se define el lenguaje de programación a utilizar. Procurando que sea un lenguaje de alto nivel y que permita la portabilidad del código.

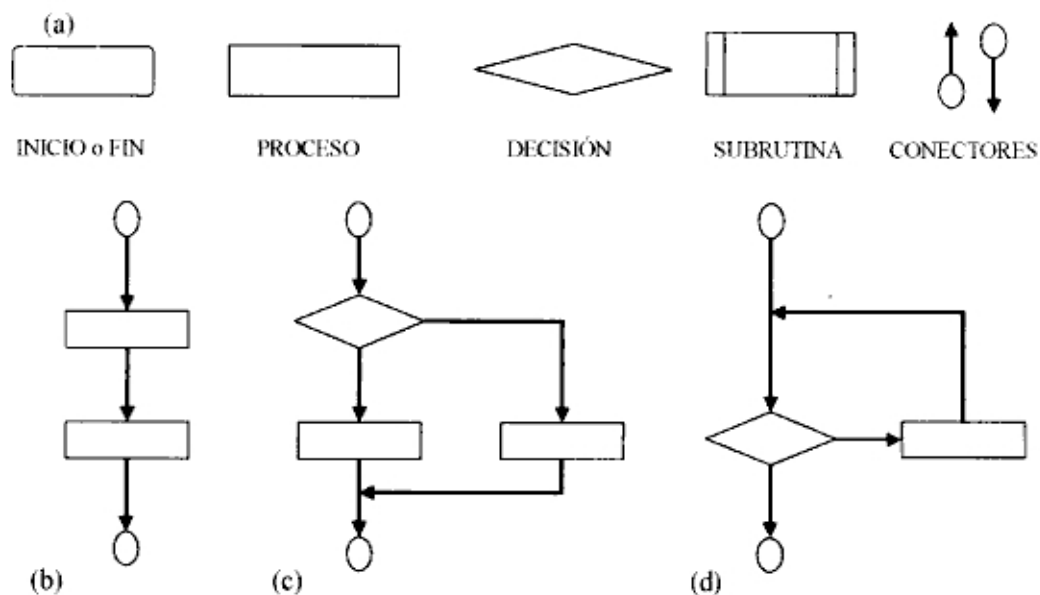


Figura 39. (a) Símbolos básicos de los diagramas de flujo [41]. Se muestran las estructuras de control: (b) Estructura de secuencia. (c) Estructura de selección y la (d) estructura de repetición

- **Diseño del diagrama de flujo.**- para el desarrollo de la programación se utilizó la llamada programación estructurada. Es decir, el programa se realizó usando sólo tres estructuras de control: la estructura de secuencia y la estructura de selección y la estructura de repetición. Las cuales se denominan “instrucciones de control”. El diagrama de flujo se muestra en la Figura 37.
- **Codificación.**- es la etapa de llevar el diagrama de flujo a su correspondiente lenguaje de alto nivel y su compilación con el lenguaje de alto nivel se traduzca en su lenguaje máquina. De esta manera, se programa el microcontrolador con el correspondiente código máquina.
- **Depuración.**- es la etapa de corrección de la programación

5. Integración y Pruebas

La integración y pruebas de todos los subsistemas está a cargo del módulo MIP. Consiste en el montaje del nanosatélite Chasqui-I. En el presente trabajo se describe la primera prueba de integración, las prueba a temperaturas bajas (a unos $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, la prueba a bajas presiones y las pruebas de consumo de potencia.

5 Diseño e implementación del Subsistema SIMA

Por lo expuesto hasta ahora, el objetivo de SIMA es el obtener imágenes de la tierra desde el nanosatélite Chasqui-I y es el objetivo de esta tesis. Luego, la forma de obtener imágenes de la tierra será mediante fotografías digitales. Las fotografías digitales adquiridas son de dos tipos: en el rango del espectro electromagnético visible y espectro electromagnético del infrarrojo cercano. Entonces, se define el sistema de adquisición de imágenes compuesto del sistema óptico, el sensor de imagen, el sistema de conversión de señales analógicas a digitales, el protocolo de comunicación y el medio de almacenamiento. Además, este sistema es parte del nanosatélite Chasqui-I. Es decir, el esquema a seguir se muestra en la Figura 26. Además, se tiene las siguientes limitantes para el diseño del sistema de adquisición de imagen:

- Bajo consumo de potencia; preferentemente el uso de bajos niveles de voltajes como los de 3.3V o 5.0V que son los niveles de las señales TTL.
- Programación e integración simple, porque el microcontrolador, que manejará todo el sistema del cubesat, tendrá los algoritmos del módulo SIMA y PCT provocando un uso mayor de memoria.
- Dar un archivo de imagen comprimido, por ejemplo el formato jpg.
- Son cinco los módulos que van a estar presentes con hardware en el cubesat: PCT, SIMA, CCMI, SICOM y SDCA. Por eso, haciendo una repartición de masa equitativa (1,33 kg como máximo para el estándar cubesat) a SIMA le tocaría como máximo el uso de un hardware que no presente una masa no mayor a 250,0 kg aproximadamente. En conclusión, el hardware de SIMA no debe exceder los 250,0 kg.
- Las Condiciones ambientales de trabajo del cubesat a 300 km sobre el nivel del mar son diferentes a las condiciones que se presentan a nivel del mar, así como, cambios de temperatura, cambios de humedad (si los hubiera), cambios en la presión, etc. Es necesario verificar el correcto funcionamiento del equipo a los cambios de temperatura. Por tanto, las pruebas serán la mejor evaluación para el diseño realizado.

Estos cinco puntos limitan el diseño de sistema de adquisición de imágenes para el Chasqui-I. Además, tenemos el objetivo de adquirir imágenes en el rango del espectro

IR cercano, para lo cual necesitamos emplear un sistema óptico que pueda registrar dicho rango del espectro.

Las limitaciones de potencia y el bajo nivel de voltaje de alimentación, el cual es 3.3 V, de tamaño y de masa inclinaron a decidir como sensor de imagen el sensor CMOS. Ya que, entre las ventajas que presenta este en comparación al sensor CCD son la mayor miniaturización, el bajo nivel de voltaje de funcionamiento (3.3 V) y la mayor miniaturización de los sensores CMOS. Durante la etapa de análisis funcional, al final, se evaluaron tres posibles sensores:

1) Sensor CMOS Monivision

- Dimensiones: 27mm²
- Lente óptica: 3.6mm.
- Abertura angular: 92°.
- Apertura del agujero del alfiler óptico: 50°.
- Diámetro del agujero del alfiler óptico: 1.6 mm.
- Píxeles efectivos: 628 x 582 / 356 KB.
- Min iluminación: 4lux@f1.2.
- Obturador electrónico: 1 / 50 | / 15.000.
- Salida de video (equivalente thevenin): 1VP-p, 75Ω.
- Fuente de alimentación: 12 VCC.
- Consumo: 50 mA.
- Consumo de energía: 600 mW.
- Masa (pre-empaquetados): 24 g.
- Costo: \$ 61.51.

2) Sensor Kodak 1310

- Pixel size: 6.0μm x 6.0μm.
- Resolution: 1280 x 1024 active.
- Sensor Size: 7.68mm x 6.14mm (1/2").
- ISO: 180.

- Saturation Signal: 40,000 electrons.
- Scan Modes: Progressive Scan.
- Shutter Modes: Continuous and Single Frame Rolling Shutter Capture.
- Maximum Readout Rate: 20 MSPS.
- Frame Rate: 0-15 frames per second.
- System Dynamic Range:
 - _ 56dB (1-10 MHz)
 - _ 48 dB (11-15 MHz)
 - _ 44 dB (16-20 MHz).
- Response Non-Linearity: < 2%, 0-90% V_{sat}.
- Programmable Gain Range:
 - _ Global 7.5x, 0.02x steps
 - _ White Balance 2.7x, 0.02x steps.
- ADC: 10-bit, RSD ADC (DNL+/-0.5 LSB, INL+/-1.0 LSB).
- Power Dissipation:
 - _ < 250mW (dynamic)
 - _ 25mW (standby).
- Voltaje: 3.3 V.

3) *Sensor CMOS OV7620*

- Imagen: Single chip 1/3 inch OV7620 CMOS sensor.
- Array Size: 660x480 pixels.
- Pixel size: 7.6mm x 7.6 mm.
- Progressive Scanning / interlace Effective image area: 4.86mm x 3.64mm.
- Gamma Correction: 128 curve settings.
- S/N Ratio: > 48dB.
- Min Illumination: 2.5lux @F1.4

- Operation Voltage: 5+/-0.5 Vdc.
- Operation Power:
 - _ 120mW Active
 - _ 10 mW Standby.
- Weight: 14g including lens.
- Lens: f6mm, F1.8.
- Small size: 40mm x 28 mm.

Finalmente, el sensor OV7620 presentaba la posibilidad de almacenar los archivos de imagen digital de manera comprimida en formato .JPEG, mediante el módulo C328R. Además, el sensor de imagen OV7620 está fabricado de silicio; por tanto, su respuesta sensitiva abarca el rango del espectro electromagnético visible, ver Figura 16.

5.1 Diseño e implementación del hardware y software

5.1.1 Diseño e implementación del hardware

Se procede en cuatro etapas: definición del hardware, diseño del circuito, fabricación del PCB y el montaje del PCB.

5.1.1.1 Definición del Hardware

Se definió el hardware del subsistema SIMA en cuatro bloques: el sistema óptico, que es el juego de lentes para cámara; el sistema de conversión de señal óptica a señal digital, compuesto por el filtro óptico, el sensor de imagen, el sistema conversor de corriente a voltaje, el control automático de ganancia y el sistema conversor de señal analógica a digital; el microcontrolador, el cual controla el momento de fotografiar; y un SD card, en el cual se registran los archivos de imágenes adquiridas. El esquema del subsistema SIMA se aprecia en la Figura 40. El hardware definido se menciona a continuación.

- El sensor CMOS OV7620 de OmniVision [42].
- El filtro Kodak Wratten para infrarrojo 87C [24,25].
- El modulo de cámara C328R [43].
- El lente para cámara C328R-2225 [44].
- El microcontrolador PIC18LF452 [45].

- La memoria de 1Gigabyte SD Card [46].

Además, se define para la comunicación entre el subsistema SIMA y los demás subsistemas del módulo del nanosatélite Chasqui-I con el protocolo de comunicación UART. Este mismo protocolo se usa para la comunicación con una computadora personal. Y para la comunicación entre el microcontrolador y la memoria SD Card se define el protocolo de comunicación SPI.

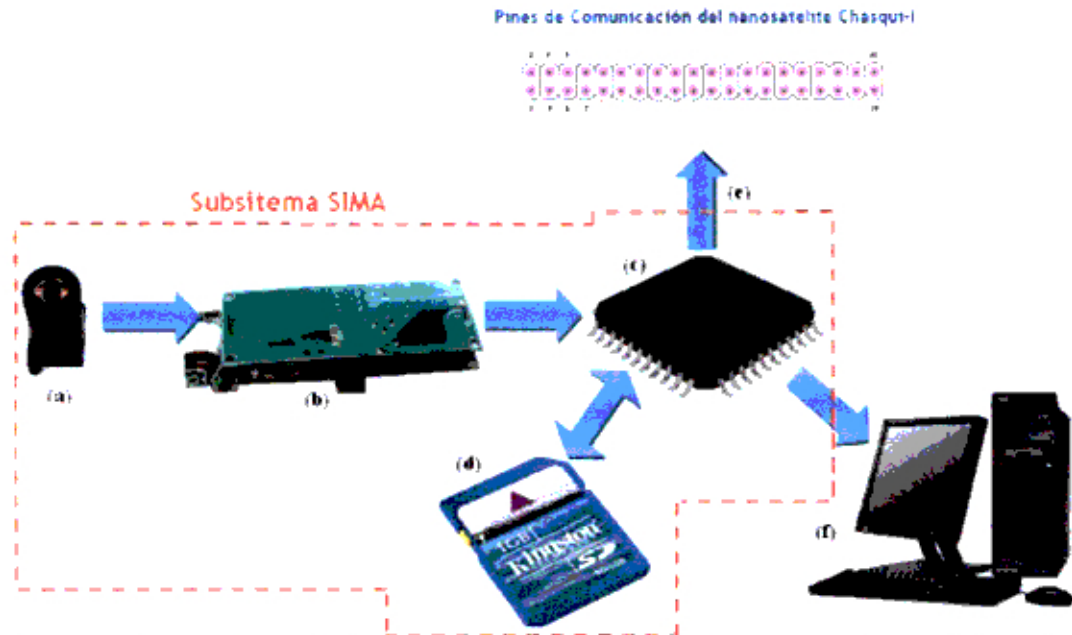


Figura 40. El subsistema SIMA del nanosatélite CHASQUI-I comprende de un sistema óptico (a), un sistema de conversión de señal óptica a señal digital (b), un microcontrolador (c) y un sistema de almacenamiento (d). Por otro lado, el microcontrolador se encargará de descargar las imágenes almacenadas en el SD Card hacia el subsistema CCMI mediante los pines de comunicaciones del nanosatélite Chasqui-I (e). Además, el subsistema SIMA tiene una comunicación con una PC para poder realizar pruebas y grabar el microcontrolador.

Se seleccionaron los módulos de cámara comerciales C328 de la marca COMedia. Poseen un sensor CMOS OV7640 de Omnivision y un sistema para la compresión JPG OV528 también de Omnivision.

Las características eléctricas del módulo de cámaras son:

- Resolución: 640 pixeles x480 pixeles.
- Fotograma por segundo: 30 fotogramas de 640 pixeles x 480 pixeles.
- Compresión: JPEG.
- Control Automático de Ganancia.
- Alimentación: 3.3V, 60mA.

- Comunicación: UART (velocidad de transmisión de 115.2 kbps máximo)
- Masa: 4 gramos.

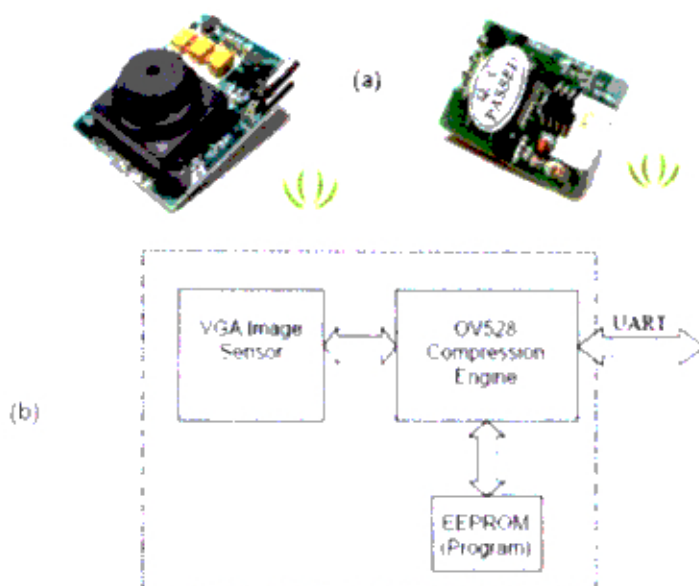


Figura 41. (a) Fotos del módulo de cámara, (b) diagrama esquemático del módulo de la cámara.

Tabla N° 1. Sumario de comandos del módulo C328R.

COMANDO	FUNCIÓN
Inicial	Configura el tamaño de la imagen a adquirir
Obtención de Imagen	Configura el tipo de archivo imagen
Captura	Obtiene la fotografía
Configuración del tamaño de paquete	Configura el tamaño de paquete que se transmite
Configuración de la velocidad de transmisión de datos	Cambia la velocidad de transmisión de datos
Reiniciar	Reinicia todo el sistema y todo el estado de maquina
Apagado	Inicia el modo dormido,
Datos	Informa la cantidad de bytes transmitidos
Sincronización	Comando de sincronización con el módulo C328
ACK	Comando de correcta sincronización
ANK	Comando de falla de sincronización

El funcionamiento del módulo de cámara C328R se divide en tres bloques, esquema modelado en la Figura 41. El sensor de imagen VGA, el microcontrolador de compresión OV528 y la memoria de almacenamiento, EEPROM. El módulo es gobernado por el microcontrolador OV528, el cual tiene una salida UART como interface de comunicación. El SD Card utilizado fue de la marca Kingston.

El protocolo de comunicación establecido entre el módulo C328R y el microcontrolador o la PC es UART. Para un byte de transmisión se usa un Bit de inicio en baja, luego ocho bytes transmitidos y finalmente un Bit de parada en alta, en la Figura 42 se muestra el esquema de transmisión para el byte 01110001.

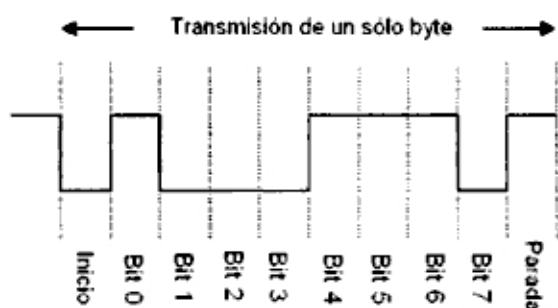


Figura 42. Byte de transmisión en protocolo UART para 01110001.

Cuando el microcontrolador o la PC se comunican con el módulo C328R lo hace mediante comandos (ver Tabla N° 1). Cada comando consta de 6 bytes. Como ejemplo, el comando de Sincronización es AA0D0000000h que se observa en la Figura 43.

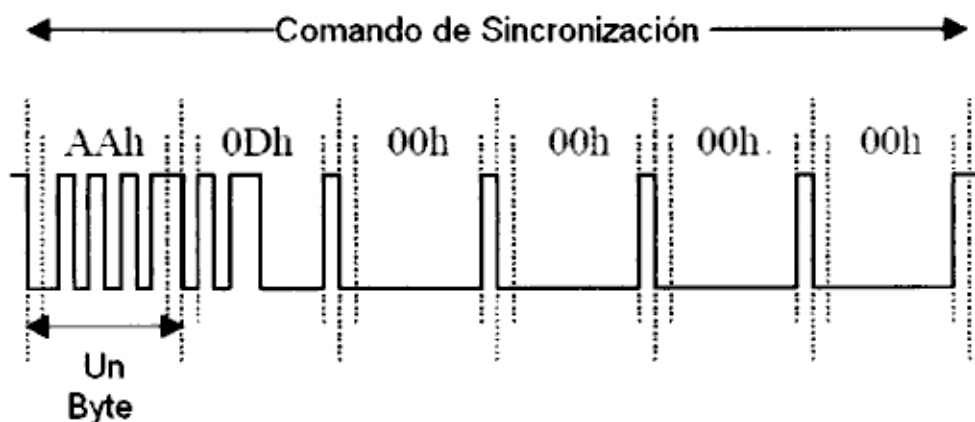


Figura 43. Comando de sincronización, diagrama de tiempos.

Al iniciar la captura de imagen, esta se transmite al OV528 y este, luego, almacena la imagen en la memoria EEPROM. Por el contrario, al descargar una imagen del módulo

C328R, el OV528 descarga la imagen almacenada en la EEPROM y es transmitida al microcontrolador.

El diagrama esquemático del compresor JPG (OV528) se observa en la Figura 44. Dicho integrado es un microcontrolador el cual posee 11 órdenes pre-establecidas y que son activadas desde el HOST (Módulo CCMI del Chasqui-I). Dichas órdenes le indican con que calidad tomar la foto, cuando debe tomar la foto, variar la resolución de la foto, etc.

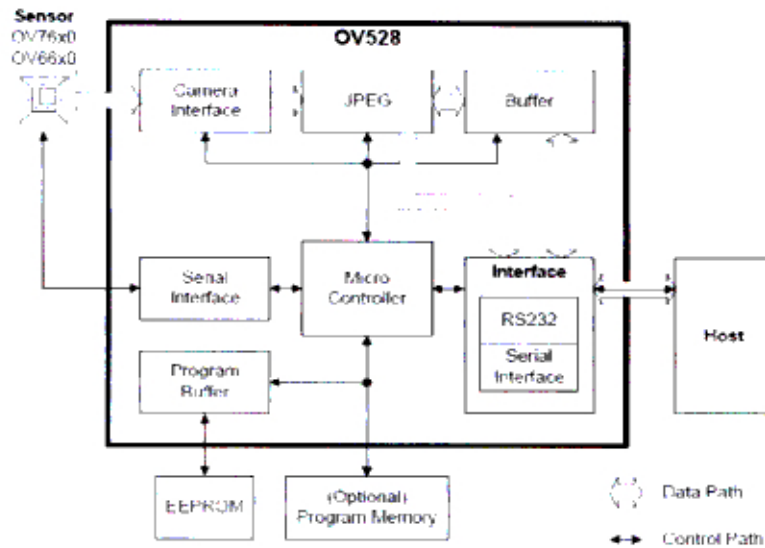


Figura 44. Diagrama en bloques del circuito compresor JPG (OV528)

En la figura 45, se muestra las líneas de salida del módulo de cámara C328R la cual tiene cuatro líneas para la comunicación con algún ordenador que en este caso vendría a ser el microcontrolador PIC18F452, o una computadora.

- El pin VCC es la línea de alimentación para el módulo C328R y es de 3.3 V.
- El pin TxD es la línea de transmisión del módulo C328R.
- El pin RxD es la línea de recepción de señales del módulo C328R.
- El pin GND es la línea de tierra común para el módulo C328R.

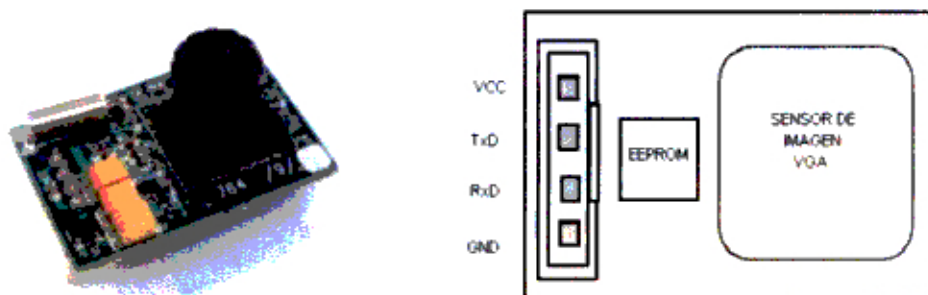


Figura 45. Se muestra el módulo de la cámara y los componentes principales que la componen, así como la disposición de sus cuatro líneas de comunicación

Los rangos de voltaje TTL de ésta cámara son de 0.0 V a 0.8 V para el Nivel Bajo y 2.0 V a 3.3 V para el Nivel Alto. Por otro lado, el voltaje TTL del microcontrolador es de 0.0 V a 0.8 V Nivel Bajo y de 2.0 V a 5.0 V Nivel Alto. Además, el protocolo de comunicación RS232 presenta un voltaje del Nivel Bajo de -8.0 V a -12.0 V y de 8.0 V a 12.0 V para el Nivel Alto.

Se utilizó un módulo de desarrollo para el PIC18F452, observar la Figura 46. Este módulo permite alimentar el microcontrolador y habilitar los periféricos, se denomina periféricos a los pines que posee el microcontrolador, del mismo. A continuación, se describe los componentes que se muestran en la Figura 46:

1. Entrada de alimentación (9-12VDC) para los circuitos integrados del módulo.
2. Microcontrolador de 40 pines.
3. Cristal de 4MHz que determina la frecuencia de trabajo del microcontrolador.
4. MAX-232 que es un dispositivo que se encarga de convertir los niveles TTL (del PIC18F452) al estándar RS-232 (del módulo de la cámara) y viceversa para la sincronización y comunicación entre éstos dispositivos.
5. Son las salidas para la comunicación RS-232 con la cámara, que se realiza bajo tres líneas Rx (recepción de datos), Tx (transmisión de datos) y GND que es el voltaje de tierra para el sistema.
6. Interfaz para la conexión del microcontrolador con otros dispositivos, para el sistema se utiliza tres pines adicionales para la comunicación SPI con la memoria SD.

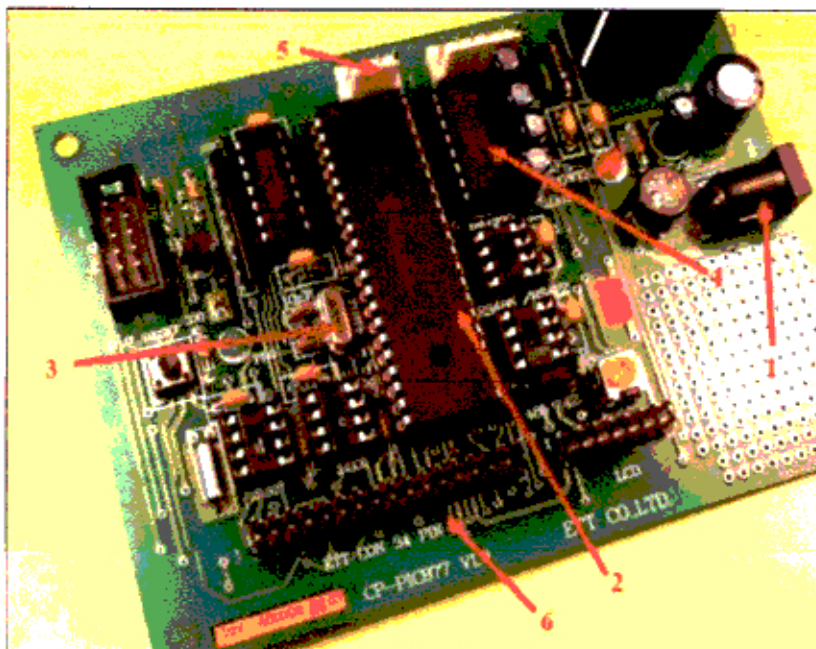


Figura 46. Módulo utilizado para las pruebas del PIC18F452.

5.1.1.2 Diseño del Circuito

El diseño eléctrico mostrado en la Figura 48 fue desarrollado según el esquema que observamos en la Figura 47. En la Figura 47, de derecha a izquierda, el módulo C328 se comunica con el PIC18F452 usando el protocolo UART, mediante este controlador se puede modificar la resolución de la imagen a fotografiar, el tipo de formato del archivo de imagen, etc. Luego, el PIC18F452 se comunica con la memoria SD Card mediante el protocolo SPI. Además, se observa en el diagrama el MAX 232 y el EV232V2, estos sirven para llevar los niveles TTL a RS232 y luego volver al nivel TTL tal cual se muestra en el diagrama de la Figura 48. Fue necesario convertir los niveles TTL a RS232 para poder hacer pruebas de la cámara con una PC motivo por el cual se redonda, si se observa no es necesario convertir los TTL a RS232.

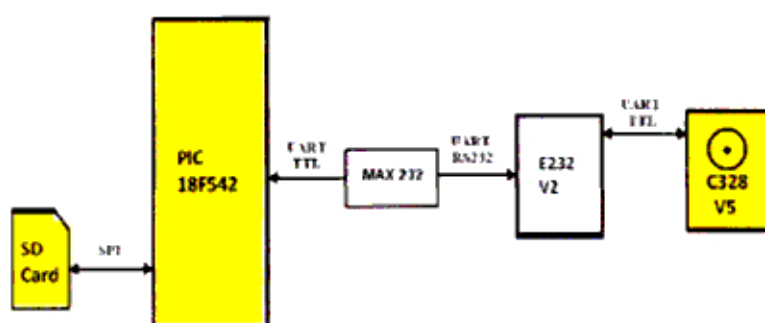


Figura 47. Se muestra de amarillo los componentes que se desean comunicar (C328V5 - PIC18F452 - SD Card). Los elementos de color blanco (MAX 232 y E232V2) sirven para llevar los niveles TTL a RS232 y, luego, a TTL de los niveles lógicos del protocolo UART.

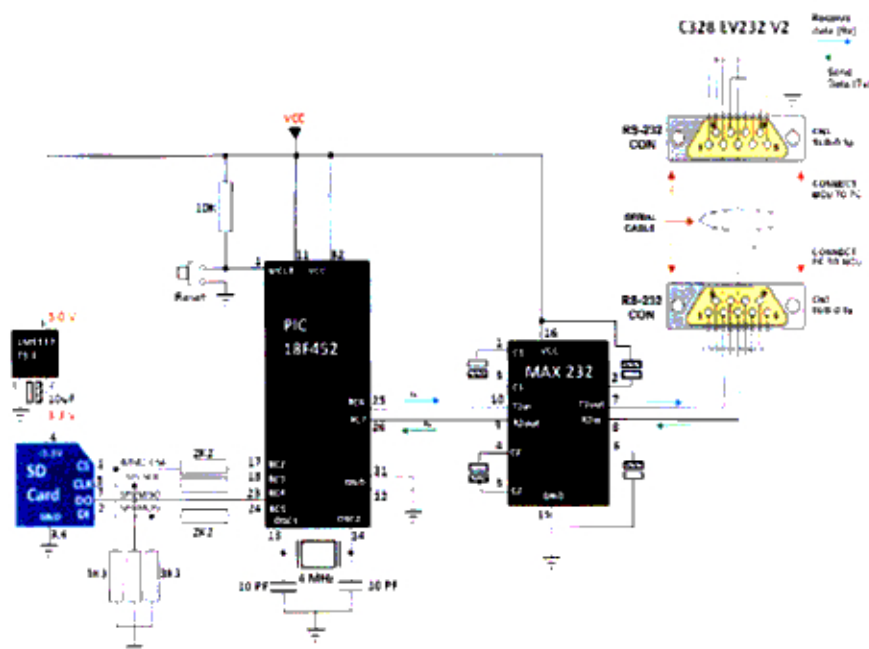


Figura 48. Diseño eléctrico implementado para el manejo del módulo de cámara C328.

Una vez comunicada la cámara con el microcontrolador, es necesaria la comunicación de este con una memoria para el almacenamiento digital de las imágenes, para este propósito disponemos de una memoria SD Card Kingston de 1GB de capacidad y de un módulo especial para las memorias SD/MMC como se muestra en la Figura 49. La comunicación entre el microcontrolador y la memoria SD es mediante el modo SPI, donde la memoria trabajará en modo esclavo con niveles de voltaje de 0 V a 3.3V, luego, debido a que el microcontrolador opera a niveles de 0 V a 5 V se tendrá que construir divisores de voltaje en las líneas de comunicación entre estos dispositivos.

Luego, con el sistema construido se procede a programar las instrucciones que el microcontrolador debe ejecutar para la comunicación con los componentes ya mencionados, por lo que se utiliza un software compilador en C/C++, este genera seis archivos de diferentes extensiones entre las que destacan tres:

***.c** los archivos con esta extensión contienen la programación en lenguaje C.

***.asm** los archivos con esta extensión contiene la programación en lenguaje ensamblador, el lenguaje ensamblador es un lenguaje de bajo nivel que representa de manera más directa el código máquina.

***.hex** este tipo de archivos es el que debe ser grabado en el microcontrolador.

Para grabar el archivo *.hex en el microcontrolador es necesario emplear un circuito grabador y su correspondiente software. Para esto se pueden utilizar algunos de los puertos E/S disponibles en cualquier computadora. Estos circuitos denominados programadores de PICs usan la conexión del puerto USB, paralelo o serie (RS-232) de las computadoras.

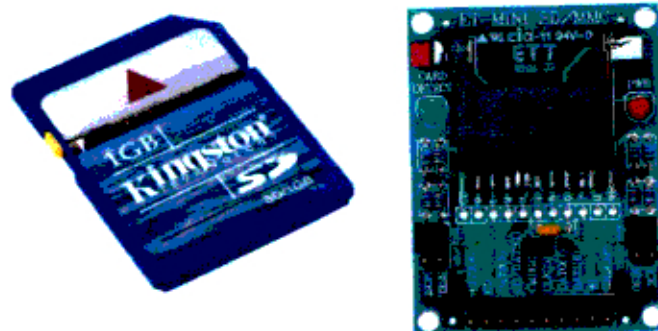


Figura 49. Se muestra la memoria utilizada y un módulo, fabricado por la empresa tailandesa ETT, para su comunicación con algún ordenador.

El software WinPic800 es el programa utilizado para grabar el programa en el PIC 18F452 y es software libre (freeware). El programa trabaja con ficheros *.hex que fueron creados con el compilador en C/C++. Para eso, se coloca el PIC en el circuito programador JDM que se encuentra conectado al puerto COM1 de la PC; luego, desde el programa WinPic800, se selecciona el tipo de grabador que se utilizará, en nuestro caso, la opción JDM e iniciamos la grabación. Al término de la grabación, se retira el PIC del grabador JDM y lo colocamos en el módulo de desarrollo (ver figura 46).

El hardware desarrollado consiste de un módulo comercial C328R estándar y otro C328R-2225 de la marca COMedia. El módulo C328R se encarga de registrar imágenes en el espectro visible y el módulo C328R-2225 sirve para fotografiar imágenes en el espectro IR cercano. Estos módulos se diferencian por sus sistemas ópticos, mas no en el diseño eléctrico. Las diferencias más notables, el campo de vista diagonal del módulo C328R (41°) es menor que el módulo C328R-2225 (109°), C328R tiene un filtro de corte IR que no tiene C328R-2225. Podemos apreciar esas diferencias en la Tabla 2. Ambos módulos poseen un sensor CMOS OV7640 de Omnivision y un sistema para la compresión JPG OV528 también de Omnivision.

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los sistemas de lentes

Descripción	C328R	C328RS	C328R-2225	C328R-2820	C328R-3620IR	C328R-3620	C328R-6016	C328R-6016IR
F/#	2.8	2.8	2.5	2.0	2.0	2.0	1.6	1.6
Longitud focal (mm)	4.63	4.63	2.2	2.8	3.6	3.6	6.0	6.0
Campo de Vista Diagonal - FOV (°)	41	41	109	81	50	50	43	43
Opción de Filtro IR-filtro de corte	si	si	no	no	si	no	no	si
Altura Total del PCB H (mm)	10	10	18	22	22	22	20	20
Diámetro del casquete del lente (mm)	9	9	15	14	14	14	14	14

Se utilizó el hardware mostrado en la Figura 50 para los ensayos de programación. Aquí, se observa el módulo de cámara C328R-EV232 conectado al módulo de desarrollo basado para el PIC18F452 (ver Figura 46) y este, a su vez, conectado al

módulo para la memoria SD (ver Figura 49). La conexión se realizó tal cual el esquema de la Figura 48. El módulo C328R se comunica con el módulo EV232 y se usa el protocolo de comunicación UART con niveles lógicos TTL, el módulo EV232 convierte los niveles lógicos TTL a niveles lógicos RS232 (esto sirvió para el monitoreo con un PC). Después, el módulo EV232 se conecta al módulo de desarrollo del PIC18F452. Antes de que la comunicación con niveles lógicos RS232 llegara al PIC18F452, se convierte los niveles lógicos RS232 a niveles lógicos TTL con un MAX232. Finalmente, se comunica el PIC18F52 con la memoria SD Card Kingston de 1 Gigabyte. Para la comunicación de los anteriores, se utiliza un circuito divisor de voltaje formado con resistencias de 2.2 k Ω y 3.3 k Ω (Figura 31); ya que, el microcontrolador utilizó 5 V. DC y el SD Card sólo puede trabajar a un voltaje de 3.3 V. También, se utilizó un regulador de voltaje LM1117 para cambiar el nivel de voltaje de 5.0 V a 3.3 V y, de esta manera, alimentar SD Card Kingston de 1 Gigabyte.

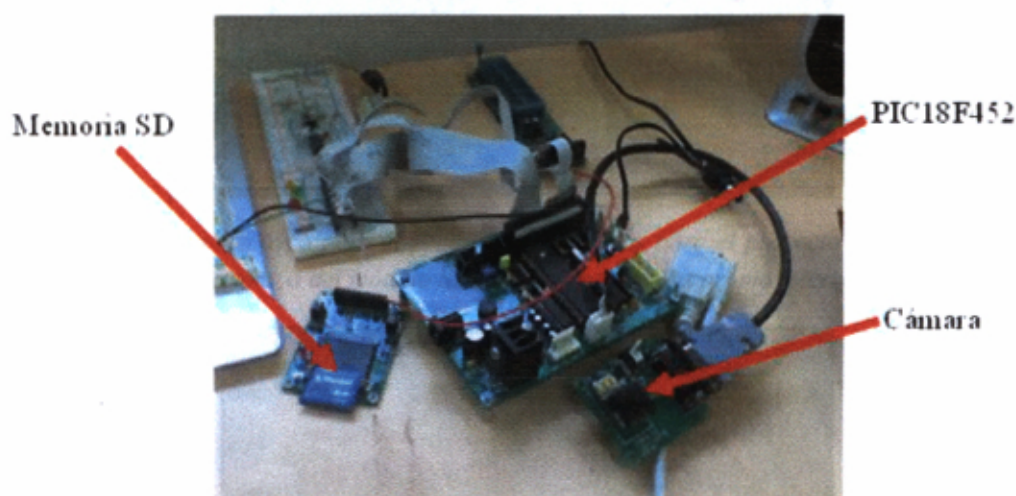


Figura 50. Fotografía del diseño eléctrico para depuración de la programación del microcontrolador.

5.1.1.3 Fabricación del PCB

El diseño del PCB realizado para el prototipo de pruebas y de vuelo se muestra en la Figura 51 y la Figura 52 respectivamente. En el prototipo de pruebas la placa del módulo SIMA carece de microcontrolador, pues el módulo se manejaba con el microcontrolador del módulo CCMI mediante la comunicación UART. Esta comunicación, se realizaba a través de los pines RxCCMICAM y TxCCMICAM. La energía se suministro a través de los pines V0.0CAM y V3.3PCT. Para habilitar las

cámaras se definió el pin ENABLE, cuando está recibe una señal en baja se habilita las cámaras, sino se mantiene en estado de bajo consumo a las cámaras. Por último, para el seleccionar alguna de las cámaras se tuvo el pin SELECT, al tener una señal en alta por el SELECT se habilita la cámara VISIBLE para la adquisición de imágenes; por el contrario, al pasar una señal en baja por el pin SELECT se habilita la cámara NIR.

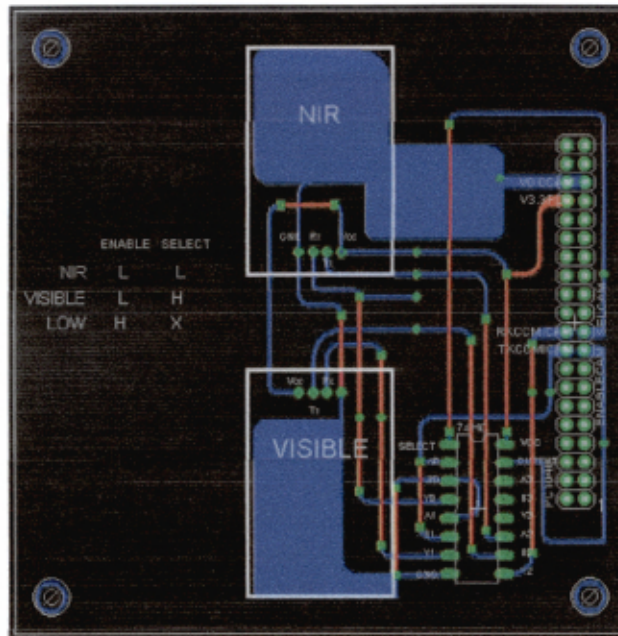


Figura 51. Diseño eléctrico para el prototipo de pruebas para el proyecto Chasqui-I. En este diseño, la placa electrónica del módulo SIMA no cuenta con su propio microcontrolador.

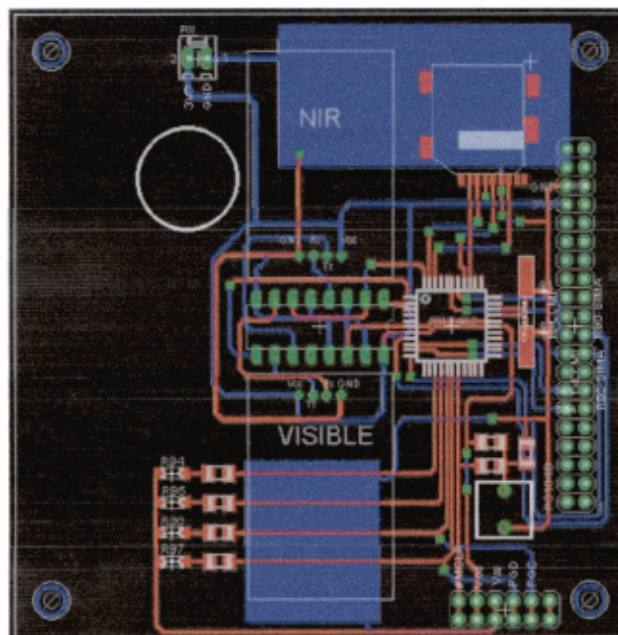


Figura 52. Diseño eléctrico para el prototipo de vuelo del proyecto Chasqui-I. En este diseño, la placa electrónica cuenta con su propio microcontrolador que es el 18LF452.

5.1.1.4 Montaje del PCB

El montaje del PCB se desarrollo en las instalaciones del Centro de Tecnología de Información y Comunicaciones. A continuación, se observan imágenes de lo desarrollado. La placa del subsistema SIMA del prototipo de pruebas del nanosatélite del Chasqui-I

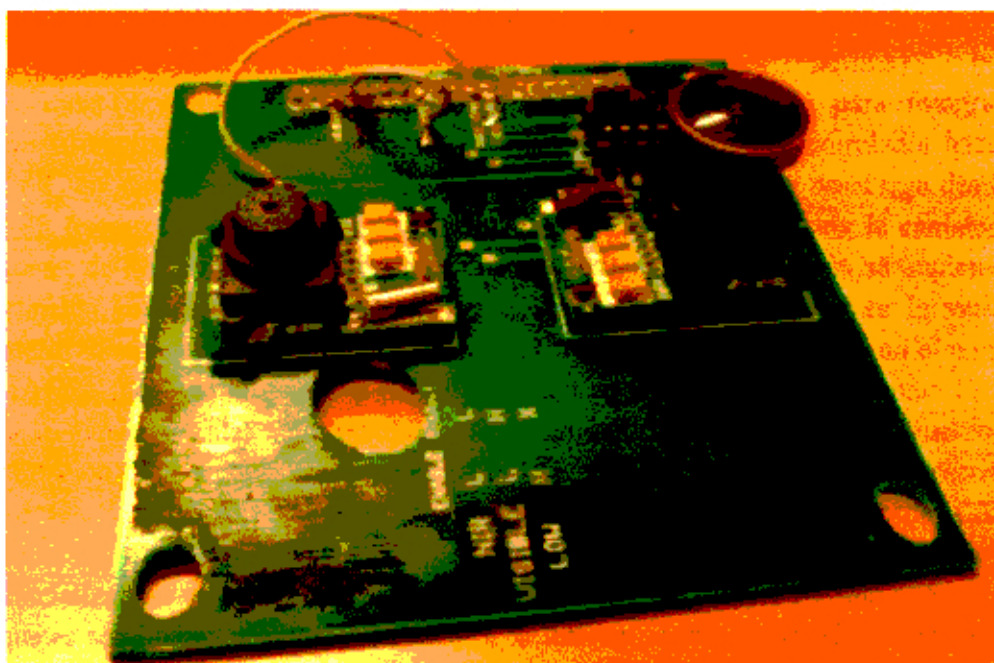


Figura 53. Placa electrónica del módulo SIMA para el prototipo de pruebas

5.1.2 Diseño e implementación del software

5.1.2.1 Definición del Software

Se describe el diagrama de flujo principal para adquirir una imagen con el módulo de cámara C328R y almacenarla en el SD Card. Este programa se implementó con el objetivo de realizar pruebas con el subsistema de adquisición de imágenes. Primero, se inicializan las variables que son el espacio de memoria de 12 bytes para los comandos transmitidos desde el C328R hacia el microcontrolador (byteRecibido[12]), el nombre de archivo (filename[] = "IMAGEN01.TXT"), la cantidad de bytes transmitidos del módulo C328R hacia el microcontrolador (numeroDeBytesTransmitidos), el número de paquetes de 512 bytes que se dividirá el archivo de imagen (numeroDePaquetes), el espacio de memoria de 512 bytes de tamaño para almacenar los paquetes de archivo de imagen transmitidos del C328R hacia el microcontrolador (memoria[512]) y una variable como marcador que registré el término de la cantidad de bytes transmitidos (flag).

Primero se habilita los periféricos para que el microcontrolador trabaje con interrupción por recepción de datos para la transmisión por protocolo UART, `iniciarPeriféricos()`. Luego, se selecciona la transmisión de datos a una velocidad de transmisión de 14400 bits por segundos, 8 bits de datos y ningún bit de parada, `USART_Init(14400)`. Después, se inicia la sincronización entre el microcontrolador y el C328R en el cual se envía 60 veces el comando de sincronización y se espera la respuesta del mismo, `sincronización()`. A continuación, se transmite desde el microcontrolador al C328R el comando de inicialización que configura la imagen como JPEG, `inicial()`. Se sigue con la división del archivo de imagen en paquetes de 512 bytes, `seleccionarTamanoPaquete()`. Luego, se transmite el comando para fotografiar, `capturarImagen()`. Se continúa con la transmisión, desde el microcontrolador hacia el C328R, del comando para la descarga de la imagen, la imagen se descarga desde el C328R hacia el microcontrolador, `pedirImagen()`. Después, se calcula la cantidad de paquetes de 506 bytes que en la que es dividida la imagen fotografiada, se implementa la función `calcularNumeroPaquetes()` y el resultado es almacenado en la variable `numeroDePaquetes`. A continuación, se crea el archivo de imagen JPEG con el nombre "IMAGEN.jpeg" en la memoria digital SD Card en el cual se usa el formato FAT16 para la generación del archivo, `Mmc_Fat_Assign(&filename,0x80)`. Se sigue con la habilitación del archivo creado, es decir se dispone el archivo para escritura, `Mmc_Fat_Rewrite()`. Finalmente, se realiza la descarga de la imagen desde C328R hacia el SD Card, almacenando la imagen en el archivo "IMAGEN.jpeg", para lo cual se inicializa una variable como contador, $i = 0$; luego, se pide el i -ésimo paquete, los paquetes son numerados por el contador i , la función `iesimoPaquete(i)` se implementa para la descarga de un paquete de 512 bytes para lo cual transmite el comando de obtención de imagen y el microcontrolador recibe 512 bytes de el C328R de los cuales sólo 506 pertenecen al archivo imagen y los otros 6 bytes sirven de verificación; después, se selecciona la escritura en el archivo JPEG creado en la SD Card al final del último byte escrito, `Mmc_Fat_Append()`, y después, se escribe el archivo de imagen en la SD Card, `Mmc_Fat_Write(memoria, numeroDeBytesTransmitidos - 6)`; a continuación, se aumenta en una unidad el contador i y se procede a repetir lo anterior si el contador es menor que `numeroDePaquetes`.

Desde la Figura 54 hasta la Figura 64 se muestra los diagramas de flujos implementados. La codificación de estos diagramas se realizó en lenguaje de alto nivel de programación denominado C. Se utilizó el software de desarrollo MikroC.

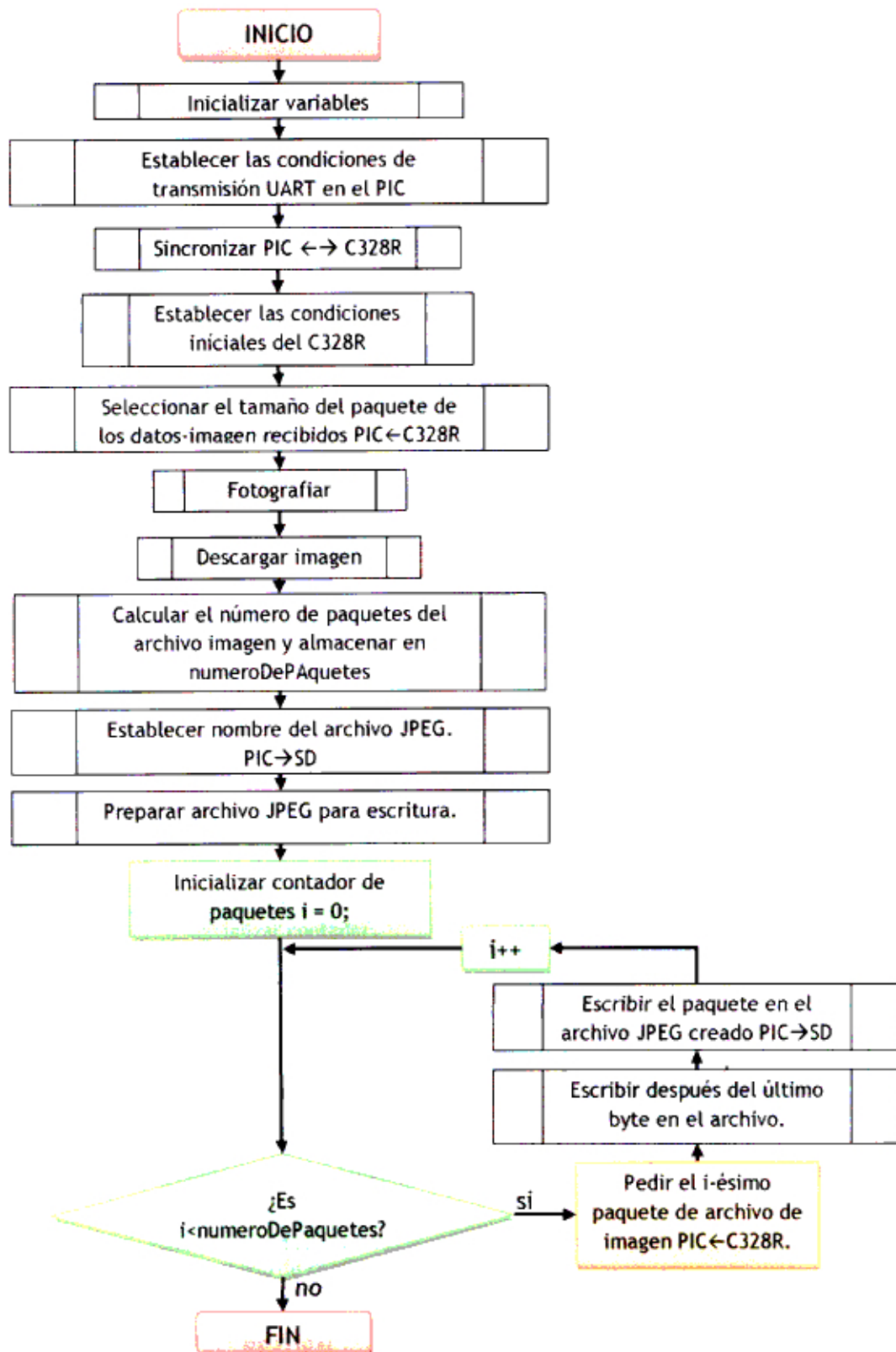


Figura 54. Diagrama de flujo del programa principal para la adquisición de una imagen del subsistema SIMA.

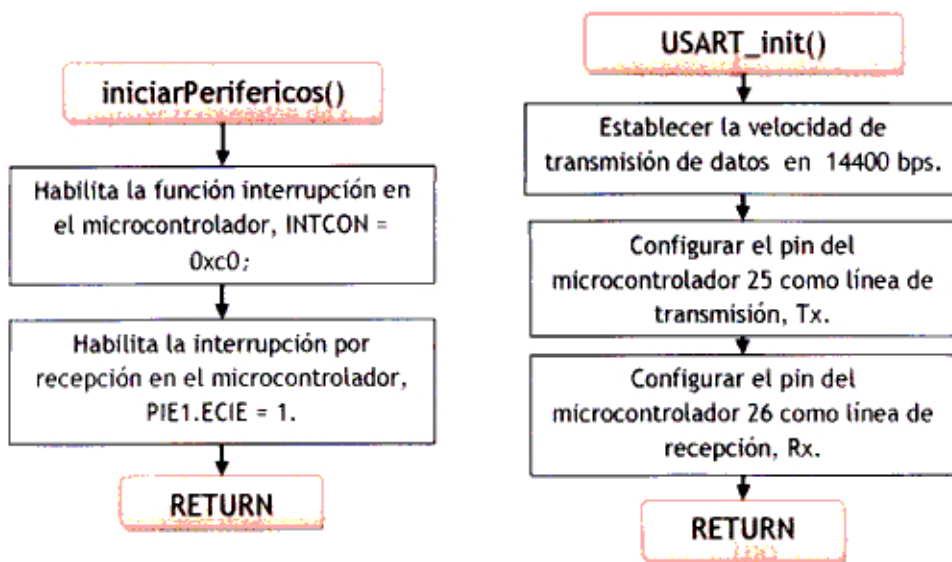


Figura 55. Diagrama de Flujo de la función *iniciarPerifericos()* y *USART_init()*.

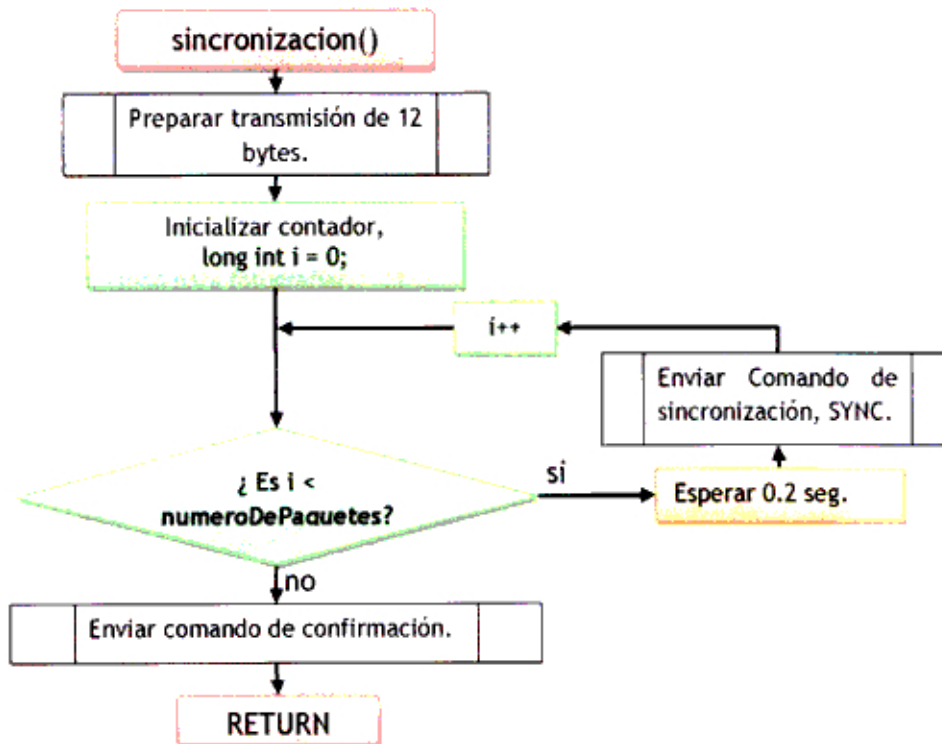


Figura 56. Diagrama de Flujo de la función *sincronizacion()*.

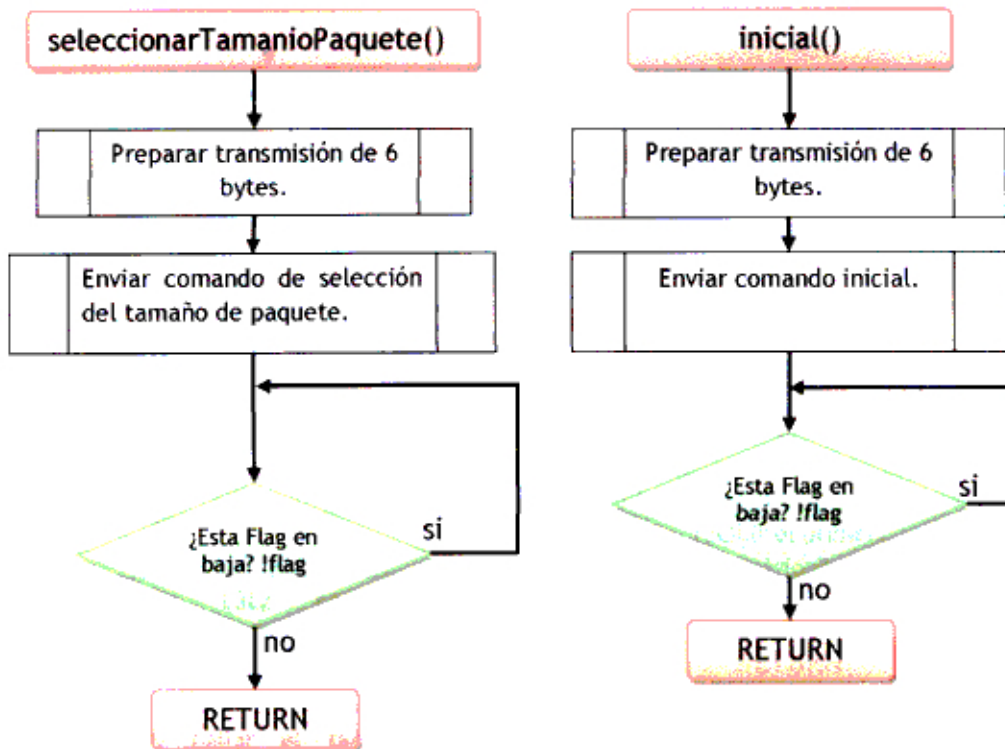


Figura 57. Diagrama de Flujo de la función seleccionarTamanoPaquete() e inicial().

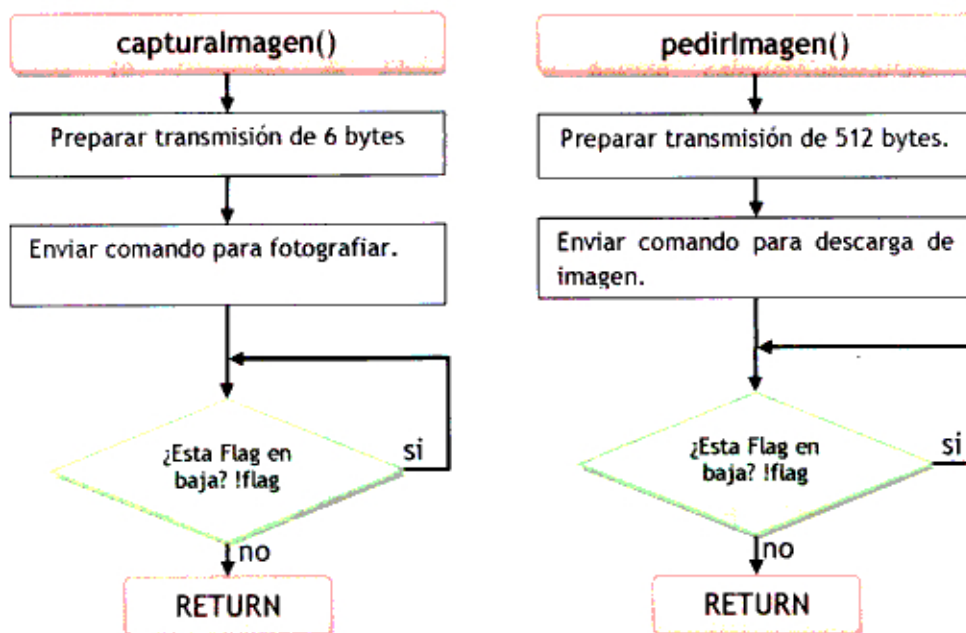


Figura 58. Diagrama de Flujo de la función capturarImagen() y pedirImagen().

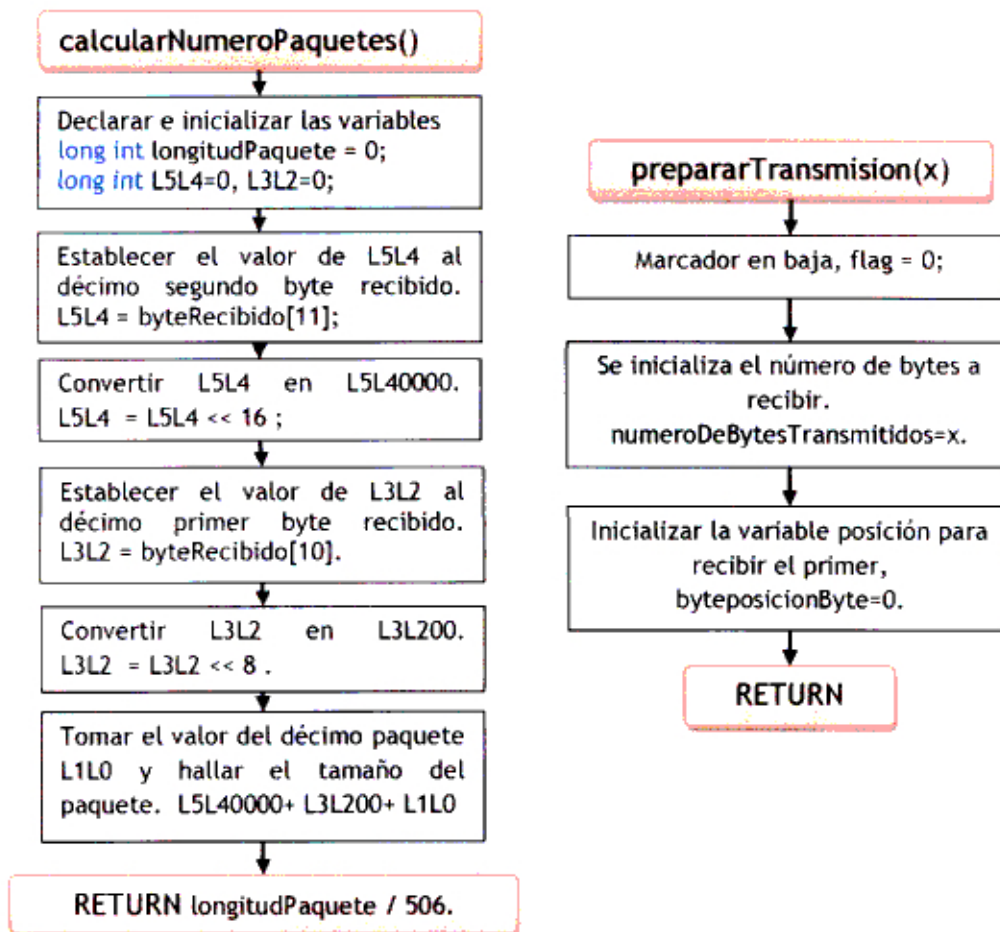


Figura 59. Diagrama de Flujo de la función calcularNumeroPaquetes() y prepararTransmision().

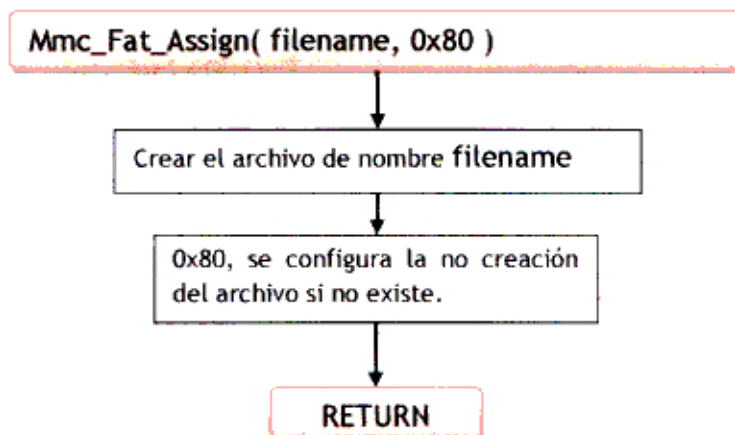


Figura 60. Diagrama de Flujo de la función Mmc Fat Assign().

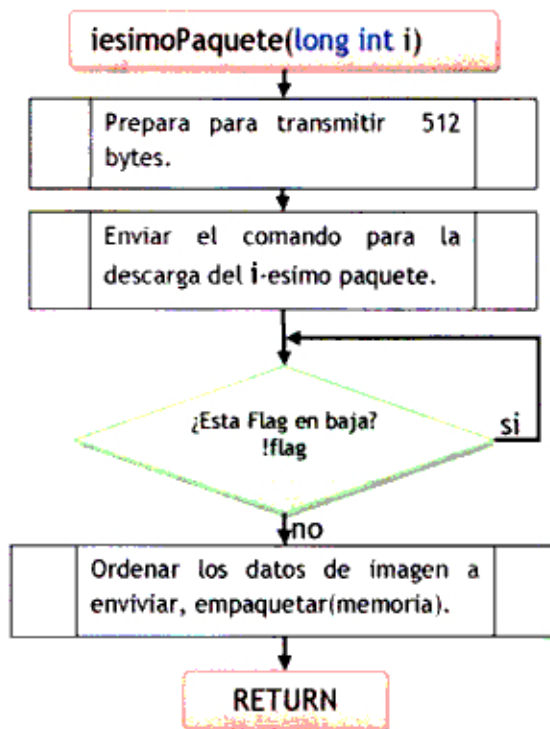


Figura 61. Diagrama de Flujo de la función iesimoPaquete().

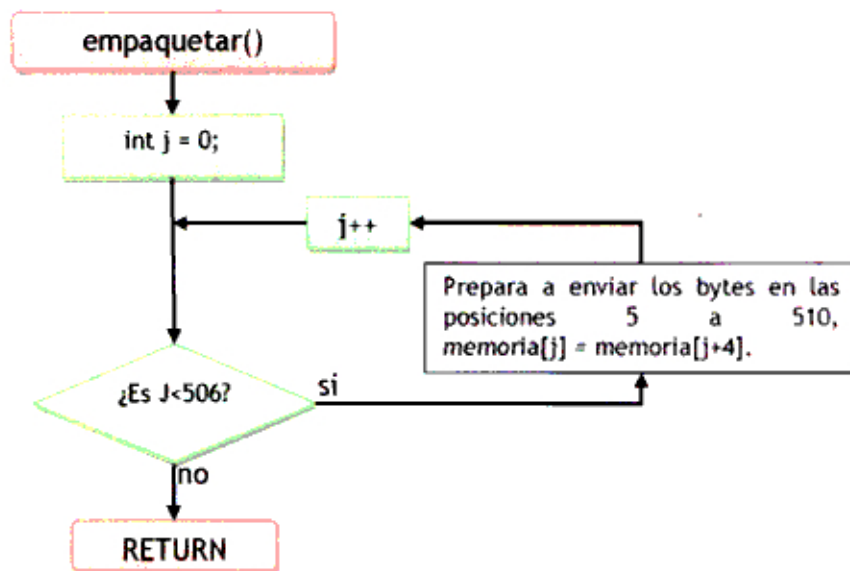


Figura 62. Diagrama de Flujo de la función empaquetar().

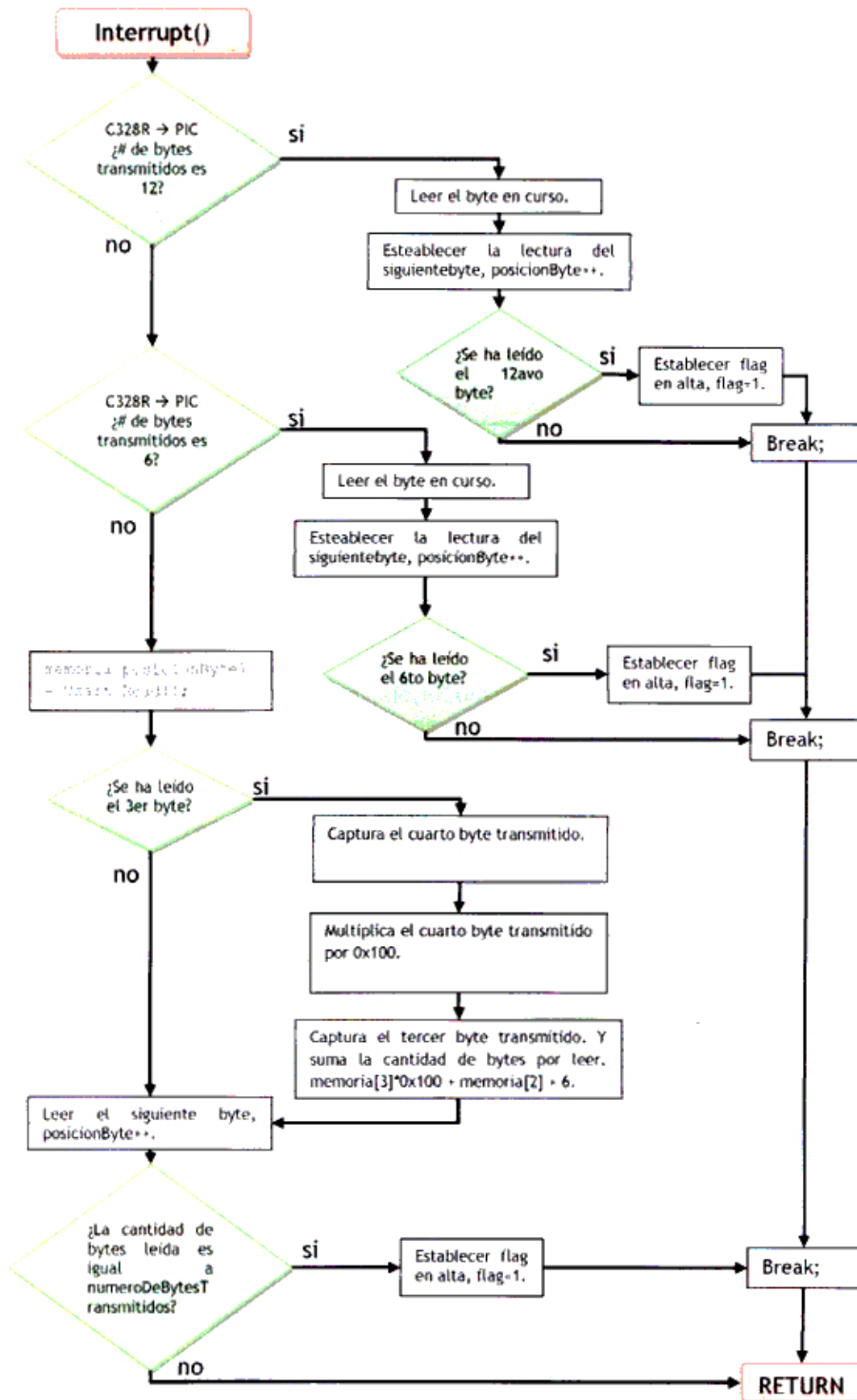


Figura 63. Diagrama de Flujo de la función interrupt().

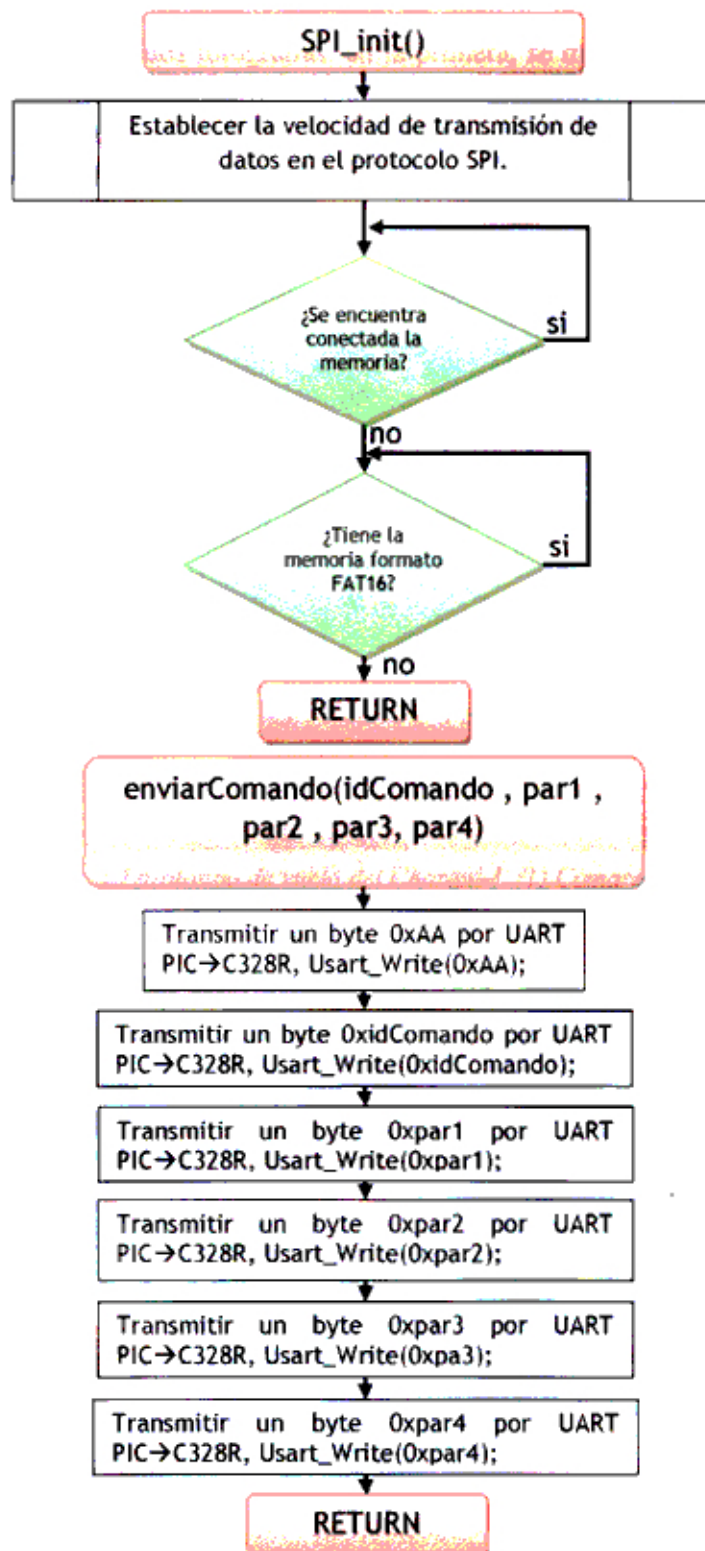


Figura 64. Diagrama de Flujo de la función SPI_init() y enviarComando().

5.2 Integración y Pruebas

La integración del nanosatélite Chasqui-I se realizó por el módulo MIP. A continuación, se muestra dos fotografías: en la primera, se muestra las cámaras NIR y Visible durante la integración del prototipo de vuelo del nanosatélite Chasqui-I, Figura 65; y en la segunda, se observa la ubicación de la placa SIMA en el integración final del prototipo de pruebas del nanosatélite Chasqui-I, Figura 66.

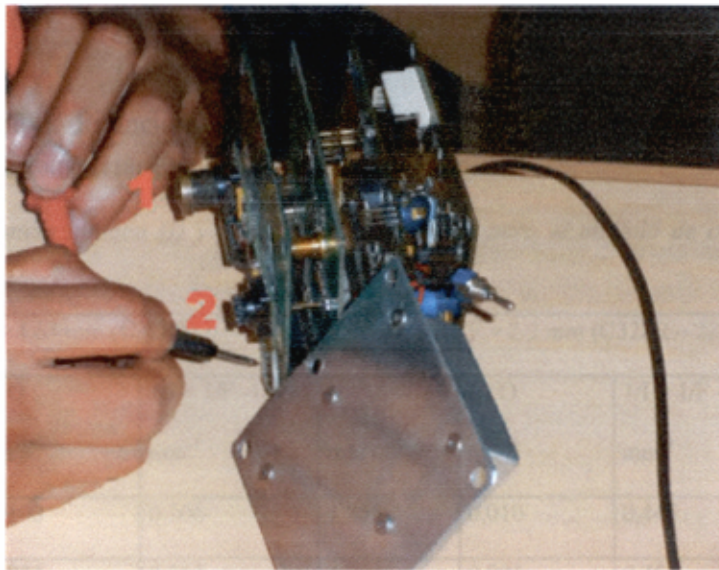


Figura 65. Integración del prototipo de vuelo del Chasqui-I. (1) Cámara que captura imágenes del espectro infrarrojo cercano, (2) Cámara que adquiere imágenes del espectro visible.

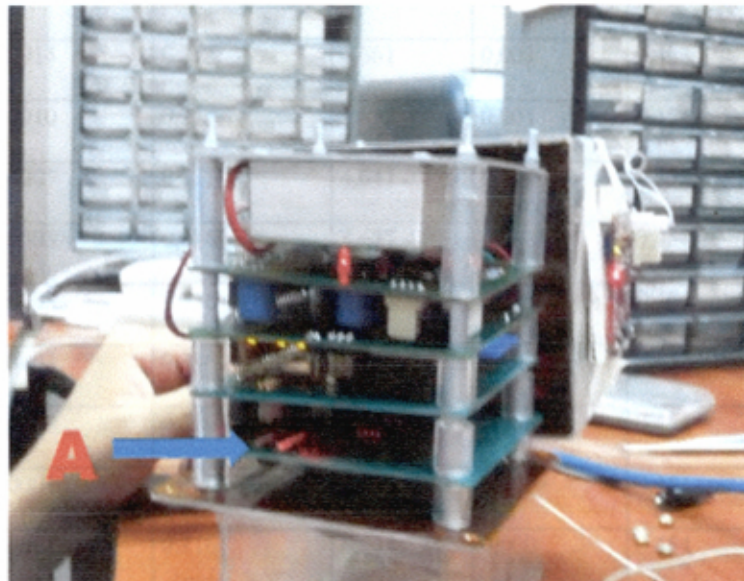


Figura 66. En la figura se observa el Chasqui-I integrado. A señala la ubicación de la placa del módulo SIMA en el cubesat.

Para poder utilizar la expresión (3) se hizo una consideración, distancias grandes (distancia entre el objeto y el sistema de lentes). Cuando se expresa distancias grandes, debe cumplirse que la distancia imagen (I) es igual a la distancia focal (F). Estos casos son particulares de los lentes a usar. En nuestras experiencias se trabajarán con dos tipos de lentes, un modelo C328R y uno C328R-2225, sus especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 3.

Los sistemas de lentes cumplen con [58]

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{I} + \frac{1}{O} \quad \dots(58)$$

Los valores de la distancia objeto serán variados hasta observar para que la distancia focal se puede considerar igual a la distancia imagen.

Tabla 3. Distancia imagen (I) y la distancia objeto (O) para el módulo de cámara C328R y C328R-2225.

O mm	F = 4.63 mm (C328R)			F = 2.2 mm (C328R - 2225)		
	1/O mm ⁻¹	1/I = 1/F - 1/O mm ⁻¹	I mm	1/O mm ⁻¹	1/I = 1/F - 1/O mm ⁻¹	I mm
100	0,0100	0,206	4,855	0,010	0,445	2,249
300	0,0033	0,213	4,703	0,003	0,451	2,216
500	0,0020	0,214	4,673	0,002	0,453	2,210
600	0,0017	0,214	4,666	0,002	0,453	2,208
700	0,0014	0,215	4,661	0,001	0,453	2,207
1000	0,0010	0,215	4,652	0,001	0,454	2,205
2000	0,0005	0,215	4,641	0,001	0,454	2,202
3000	0,0003	0,216	4,637	0,000	0,454	2,202
4000	0,0003	0,216	4,635	0,000	0,454	2,201
5000	0,0002	0,216	4,634	0,000	0,454	2,201
6000	0,0002	0,216	4,634	0,000	0,454	2,201
7000	0,0001	0,216	4,633	0,000	0,454	2,201
8000	0,0001	0,216	4,633	0,000	0,454	2,201
9000	0,0001	0,216	4,632	0,000	0,454	2,201
10000	0,0001	0,216	4,632	0,000	0,454	2,200

Como se observa en la Tabla 3, al ubicar objetos a distancias mayores a 10 m para el módulo de cámara C328R podemos considerar que la distancia imagen es aproximadamente igual a la distancia focal. Para el módulo C328R-2225 podemos considerar que la cámara observará objetos distantes a partir de distancias mayores a 2 m. En conclusión, para ambos módulos de cámara podemos decir que objetos ubicados a distancias mayores de 10 m con respecto a la lente de la cámara son considerados objetos distantes.

5.2.1 Primera prueba del prototipo de vuelo del nanosatélite Chasqui-I.

La primera prueba consistió probar el prototipo del Chasqui-I a una altura mínima de 100 m. Las funciones probadas fueron la toma de fotografías y la transmisión de data del Chasqui-I hacia la tierra (la señal se transmitió hacia una radio). Para elevar el Chasqui-I se infló un globo con Helio hasta una presión de 250 psi. Previo a esto, se hizo un nudo a una cuerda sujetando el anillo del globo para controlar la subida de este. El otro extremo de la cuerda se sujeto a una estaca (30cm es el largo de la estaca) que clavamos al suelo; asegurándonos que el globo no se escape durante el inflado. Otra cuerda se sujeto al anillo del globo y al Chasqui, esta cuerda tenía una longitud de 9 m. En la siguiente figura podemos apreciar lo ya mencionado, el cubesat que esta ensamblado carece de las placas solares. La prueba se realizó el día 10 de marzo del 2010 a las 6:00hrs (hora en Lima) en el Vivero UNI (a espaldas del METRO-UNI, Sector-T).

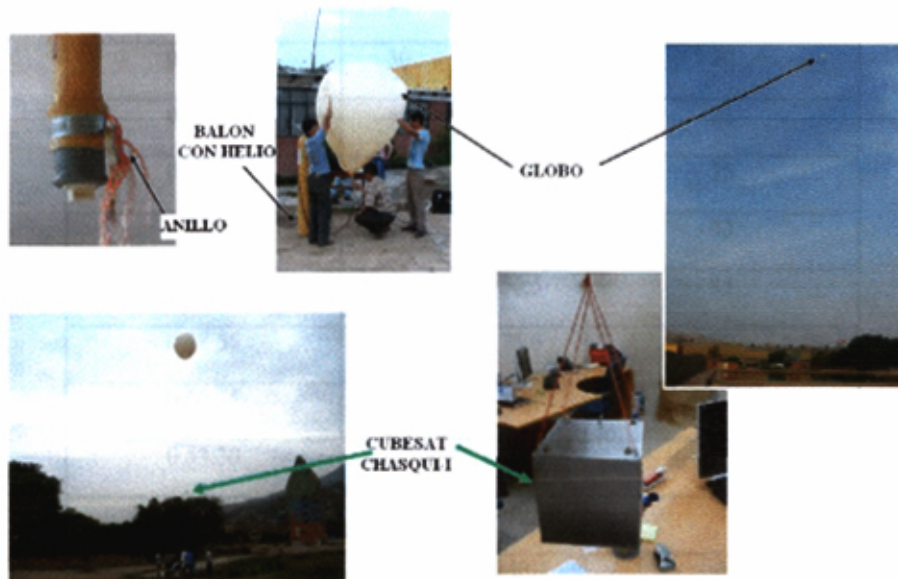


Figura 67. Imágenes de la primera prueba del proyecto Chasqui-I.

Se detuvo el ascenso del Chasqui-I cada 5 metros; esto para ver si la comunicación era correcta y se fotografiaron algunas imágenes. La toma de fotografías se programa para que sea doce por cada minuto. Finalmente, se logró elevar el Chasqui-I a una altura aproximada de 140 m.

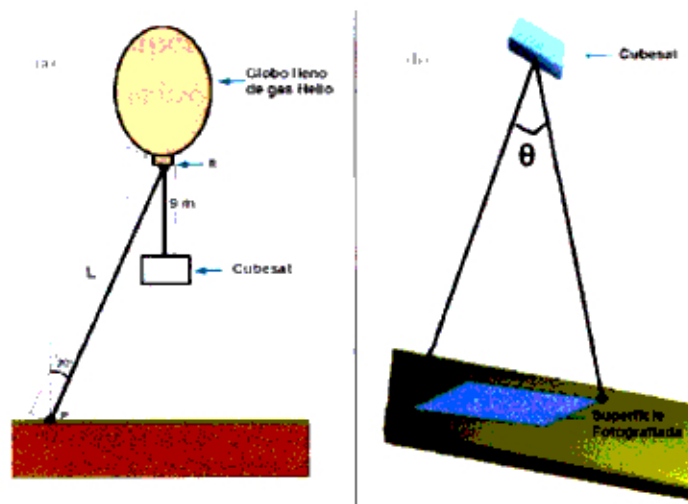


Figura 68. La imagen (a) es una representación esquemática de la prueba. La Figura (b) nos representa el ángulo de visión (FOV), denotado por θ , que subtende la cámara del cubesaat.

Tabla 3. Tabla de tiempos y altura del Chasqui-I

Tiempo (horas: minutos: segundos)	L_{cuerda} (m)	H_{chasqui} (m)	Inclinación cuerda ($^{\circ}$)
0:00:00	Encendido del Chasqui		
0:03:47	10	0,8	10
0:06:26	20	9,8	20
0:12:48	30	19,2	20
0:21:06	40	28,1	22
0:22:47	50	36,3	25
0:31:16	70	49,7	33
0:39:37	80	56,5	35
0:48:56	90	75,6	20
0:50:55	100	89,5	10
0:53:30	120	109,2	10
1:01:30	140	130,5	5
1:10:10	150	140,4	5
1:16:17	Inicio de la Bajada		
1:22:00	Fin de la bajada		
1:24:00	Apagado del Chasqui		

5.2.2 Pruebas de temperatura

En la primera prueba, se utilizó el equipo mostrado en la Figura 69:

1. Una SD Card Kingston de 1Gb.
2. Un módulo de cámara C328R.
3. Una fuente de corriente continua entre 9V y 12V.
4. El módulo de entrenamiento para microcontroladores pic de la serie 18F.
5. Un microcontrolador PIC18F452.

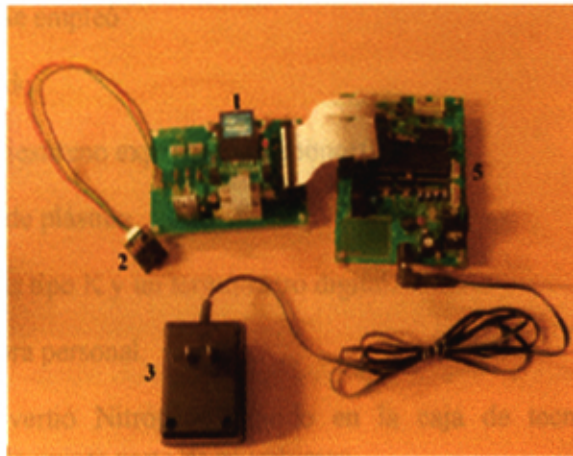


Figura 69. El hardware utilizado para la primera prueba de temperatura.

Este hardware sólo necesita ser conectado a una línea de 220 V, con referencia al transformador. Para esta prueba, se adquieren imágenes de manera repetitiva. La cantidad de imágenes archivadas en la SD Card de 1 GB depende del tamaño de la imagen, aproximadamente se pueden guardar unas 300 imágenes.



Figura 70. El equipo dentro del ambiente temperado. Tenemos la termocupla y termómetro digital para monitorear la temperatura.

Primero, se colocó el equipo dentro del ambiente temperado. Se utilizó una naranja como objeto a fotografiar. Manteniendo el ambiente a $0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, se encendió el equipo y se comenzó a adquirir imágenes de manera repetitiva cada minuto aproximadamente. Se mantuvo esta temperatura por una media hora. Luego, se disminuyó la temperatura a $-5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, la cual se mantuvo por media hora. Después que el equipo se encontrará una hora dentro del *freezer* se disminuye la temperatura a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta se prolongó por un media hora adicional. De manera similar, se procedió para la temperatura de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Finalmente, después de dos horas, se disminuyó la temperatura del ambiente entre $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta temperatura se dejó por dos horas.

Segunda prueba de temperatura, se utilizó Nitrógeno líquido para llegar a temperaturas menores a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se empleó

1. Nitrógeno líquido.
2. Una caja de poliestireno expandido (tecnoport).
3. Un contenedor de plástico.
4. Dos termocuplas tipo K y un termómetro digital.
5. Una computadora personal.

Al comenzar, se vertió Nitrógeno líquido en la caja de tecnoport hasta ocupar, aproximadamente, la quinta parte de su volumen.



Figura 71. Vertiendo el Nitrógeno líquido en la caja de tecnoport.

A continuación, se coloca el módulo C328R y las termocuplas dentro del contenedor de plástico. Se utilizó tres termocuplas. Dos termocuplas para monitorear el interior del contenedor de plástico y la otra para medir la temperatura del exterior del contenedor e interior de la caja de tecnoport.

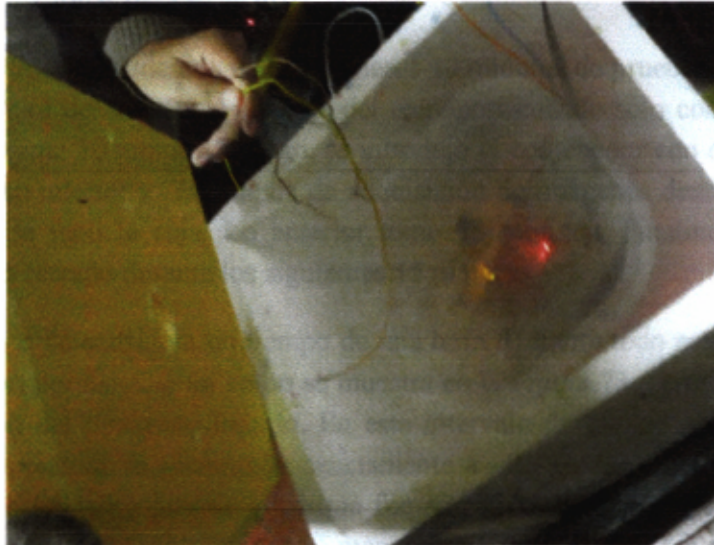


Figura 72. Vista del equipo dentro del contenedor de plástico y este dentro de la caja de tecnoport.

Finalmente, se tapó la caja de tecnoport y se mantuvo cerrada la caja por un tiempo de dos horas, esto permite la homogenización del ambiente al interior de la caja de tecnoport. Se monitoreo la temperatura en todo momento con un termómetro digital y la computadora.



Figura 73. Sistema implementado para la segunda prueba de temperatura. Se observa que el termómetro digital registra -143.3°C en la fotografía.

El termómetro digital usado era de 0.1 °C de resolución digital, el cual registra la temperatura con dos termocuplas tipo K. La primera termocupla se posiciono sobre el sistema de adquisición de imágenes; es decir, junto a la placa eléctrica, la segunda, se localizo en al ambiente dentro del contenedor de plástico; es decir, este sensor registraba la temperatura del gas frio en el interior del contenedor de plástico. Las gráficas 73 y 74 se dividen en tres zonas para su análisis:

- En la zona A es considerado en los primeros 40 minutos de prueba. Aquí se registró la temperatura del interior de la caja del tecnoport cuando sólo contenía nitrógeno líquido, durante 10 minutos. Luego, se introdujo el contenedor con dos termocuplas tipo K en su interior y el sistema de adquisición de imágenes dentro de la caja de tecnoport, se tapo la caja. Lo anterior tomo 15 minutos. Finalmente, el sistema permaneció cerrado durante los siguientes 15 minutos.
- En la zona B se considera un tiempo de una hora. Durante todo este tiempo la caja de tecnoport permaneció tal como se muestra en la Figura 73, cerrada para evitar la evaporación del nitrógeno líquido. En este intervalo de tiempo no podemos decir que la temperatura se encontraba exactamente a -40 °C; sin embargo, si se puede afirmar que las temperaturas a las que fue sometido el sistema de adquisición de imágenes fueron, en todo momento, menores que -40 °C. Por tanto, el sistema de adquisición de imágenes soporta la temperatura de -40 °C en todo momento.
- La zona C empieza a partir de los 100 minutos de prueba. En este tiempo se procede a desmontar el sistema. Se procedió a destapar la caja, retirar el contenedor de plástico, retirar las termocuplas y el sistema de adquisición de imágenes.

Otros datos:

- Se inicio la prueba a las 3:20 pm y termina a la 5:15 pm, aproximadamente.
- La temperatura más baja en la zona B es -130 °C registrado por la primera termocupla y la segunda registro -160 °C como su menor temperatura.
- El sistema de adquisición de imágenes función correctamente después de estabilizar la temperatura de este con la temperatura ambiente, demostrando que soporta temperaturas bajas hasta -40 °C.

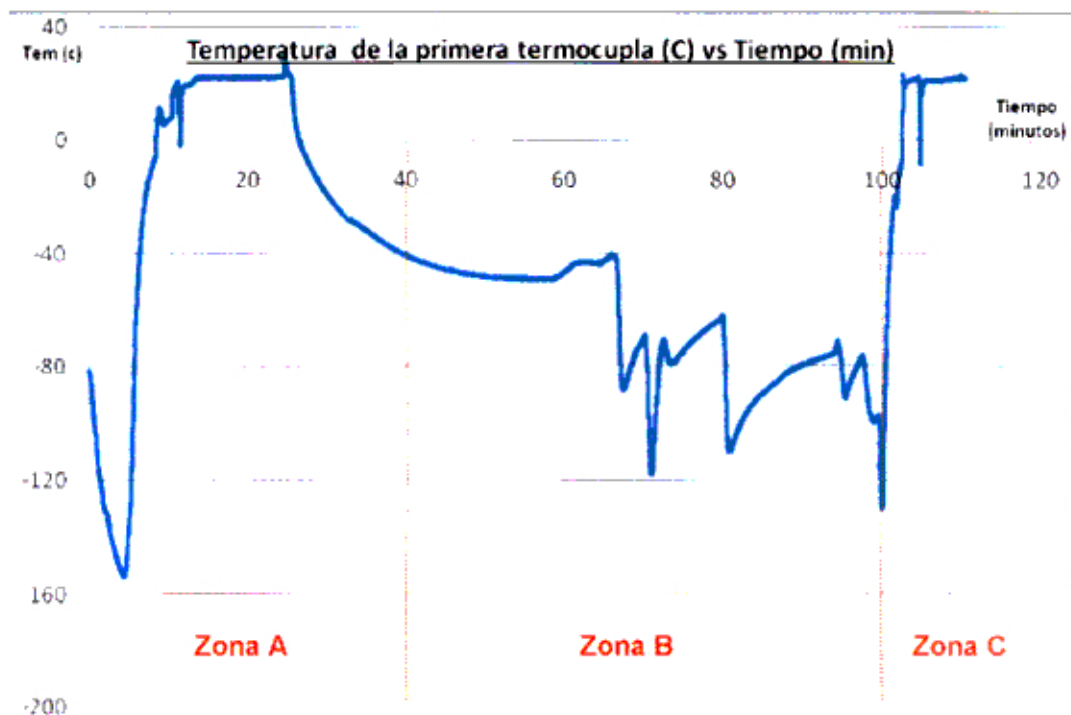


Figura 74. Gráfica de Temperatura, registrada por la primera termocupla, medida en $^{\circ}\text{C}$ vs Tiempo medido en minutos.

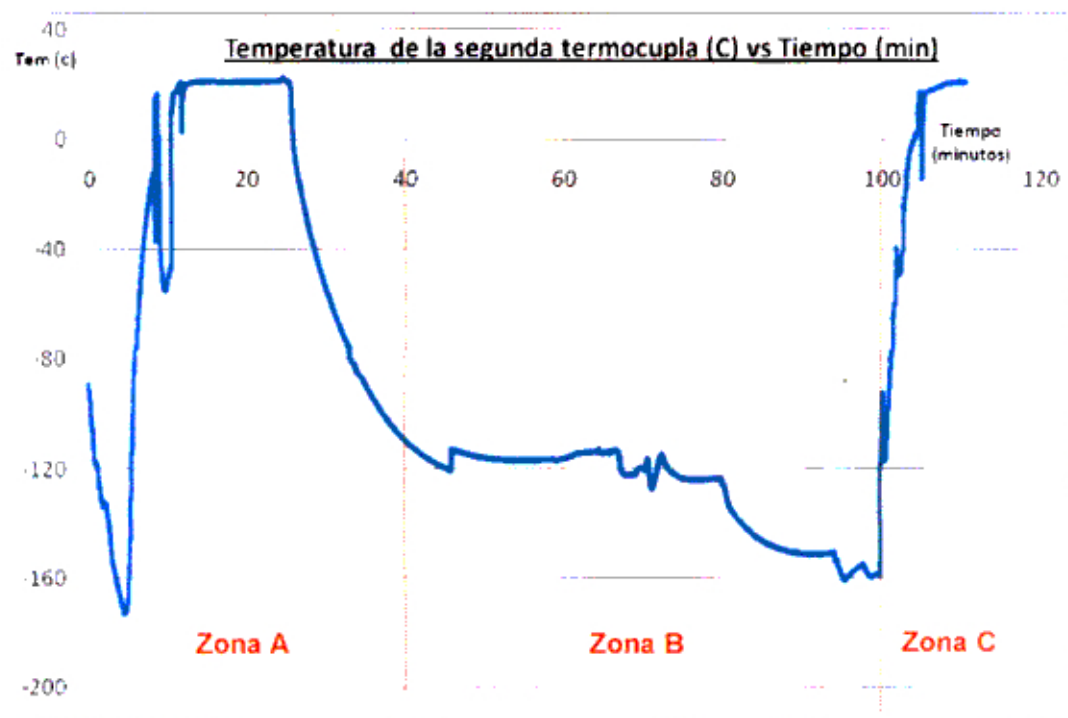


Figura 75. Gráfica de Temperatura, registrada por la segunda termocupla, medida en $^{\circ}\text{C}$ vs Tiempo medido en minutos.

5.2.3 Pruebas de presión

En la primera prueba se utilizó el equipo mostrado en la Figura 76:

1. Un conector, el cual tiene cuatro alambres sueltos son: 1.a que es tierra (0 V), 1.b es la fuente de 5 V, 1.c la señal de transmisión por UART del microcontrolador y 1.d que es la señal de recepción por UART del microcontrolador.
2. Una SD Card.
3. Un transformador que proporciona una fuente de corriente continua entre 9 V y 12 V.
4. El módulo de entrenamiento para microcontroladores pic de la serie 18F y el microcontrolador PIC18F452.

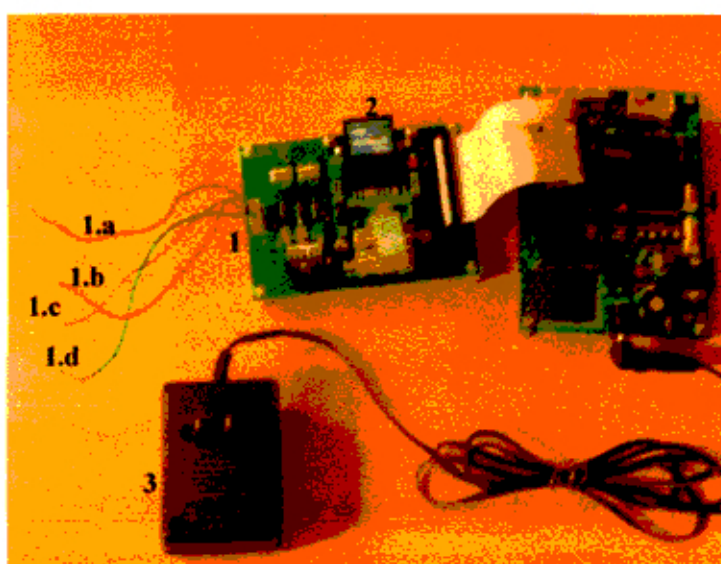


Figura 76. Hardware usado para probar el módulo C328R a bajas prestaciones

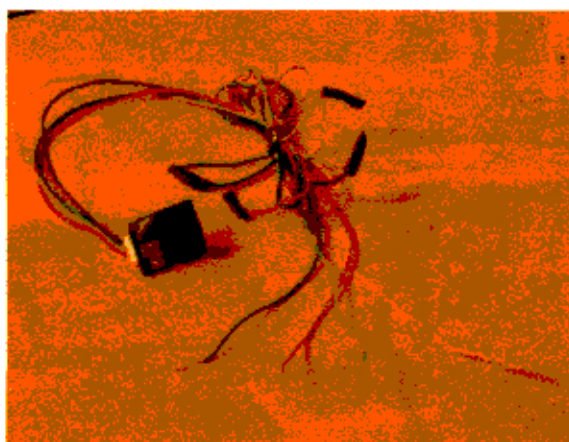


Figura 77. Módulo C328R con extensión de cables para ser utilizada en la campana de vacío.

Se extendió los cables del módulo C328R para ser conectados a las bombas de la cámara de vacío. Estas conexión se realiza en el interior de la campana de vacío y queda tal cual la Figura 78. Luego, el hardware de la Figura 76 se coloca en las bombas exteriores del sistema de vacío, estas conexiones se observan en la Figura 79. La presión al interior de la campana de vacío se midió con el THERMOTRON marca NETZ. La presión inicial fue de un bar. Se encendió el equipo llegando a la presión de 20 mbar. Se mantuvo esta presión por media hora. Luego, se procedió a disminuir la presión a 1×10^{-1} mbar y se mantuvo por media hora adicional. Finalmente, se disminuyó la presión hasta 1×10^{-2} mbar la cual se mantuvo por unas 3 horas. En todo momento el módulo C328R estuvo en funcionamiento.



Figura 78. El módulo C328R en el interior de la campana de vacío.



Figura 79. Equipo montado para la prueba de vacío al módulo C328R.

En esta Figura 79 observamos en A el hardware de la Figura 74. Este hardware es conectado a las borneras exteriores de la campana de vacío. De esta manera se aísla el interior de la campana con el exterior para poder generar el efecto de vacío. La cámara C328R se encuentra en el interior de la campana, esto es mejor apreciado en la Figura 78. La campana es de vidrio, esto permite que la cámara adquiera imágenes con una luminosidad adecuada. Un par de estas imágenes son presentadas en la sección de resultados. También, observamos el medidor de presión que registra una presión de 10^{-1} mbar en la Figura 80.



Figura 80. Medidor de presión utilizado.

5.2.4 Pruebas de Consumo de Corriente

Se tuvo el objetivo de verificar el consumo de corriente de la placa del módulo SIMA en Modo Reposo y Modo Activo. Para lo cual, se realizó un programa que después de encender la placa del subsistema SIMA, tomará una foto con la cámara Visible y luego se apagará la cámara; después, repetir lo anterior con la cámara NIR. Terminado el fotografiado, se mantuvo el sistema en modo reposo. Para el cálculo de corriente consumida:

- Se midió la corriente consumida por la placa cuando están alimentadas pero aún no son sincronizadas por el microcontrolador.
- Se midió la corriente consumida por la placa cuando está tomando fotos (Modo Activo).
- Se midió la corriente consumida por la placa cuando ambos módulos de cámaras estuvieron apagados (Modo Reposo).
- Se reinició el sistema para verificar le funcionamiento.

- Los resultados obtenidos: en Modo Inicio, el momento de encendido de la cámara, llegó alcanzar un pico 300 mA; sin embargo, al reiniciar el sistema no se observó el pico de 300 mA; y en Modo Activo, la corriente se mantiene en promedio a 63 mA.
- En Modo Reposo, la corriente es menor a 1 mA.

6 Resultados y Discusiones

6.1 Hardware y Software

Esta tesis en una primera etapa se enfocó en conseguir la manipulación del módulo de cámara C328R. El diseño empleado se muestra en la Figura 81. El cual presenta dos cámaras C328R con diferentes lentes, resistencias y un multiplexor. Con este primer prototipo se consiguió:

- Sincronizar la cámara para poder adquirir imágenes.
- Adquirir una imagen en cualquiera de sus posibles variantes: comprimido en formato JPG o descomprimido en BMP. Así como, fotografiar en los tamaños de 640x480, 320x420, 160x128, 128x128, 128x96 o 80x64.
- Pedir la imagen fotografiada por el módulo C328R con el microcontrolador y descargarla a una memoria SD Card.
- Controlar las cámaras de manera independiente pero no simultánea. Es decir, que ambas cámaras no pueden funcionar en simultáneo.

El segundo prototipo, considera un microcontrolador PIC18LF452, un conector para facilitar la programación del microcontrolador, dos cámaras, un multiplexor. Con este segundo prototipo de pruebas se consiguió:

- Tomar imágenes de manera repetitiva, haciendo uso de las dos cámaras visible y NIR.
- La variación entre captura y captura de imagen puede ser modificada en la programación del sistema.
- Tener un sistema para las pruebas de presión y temperatura.

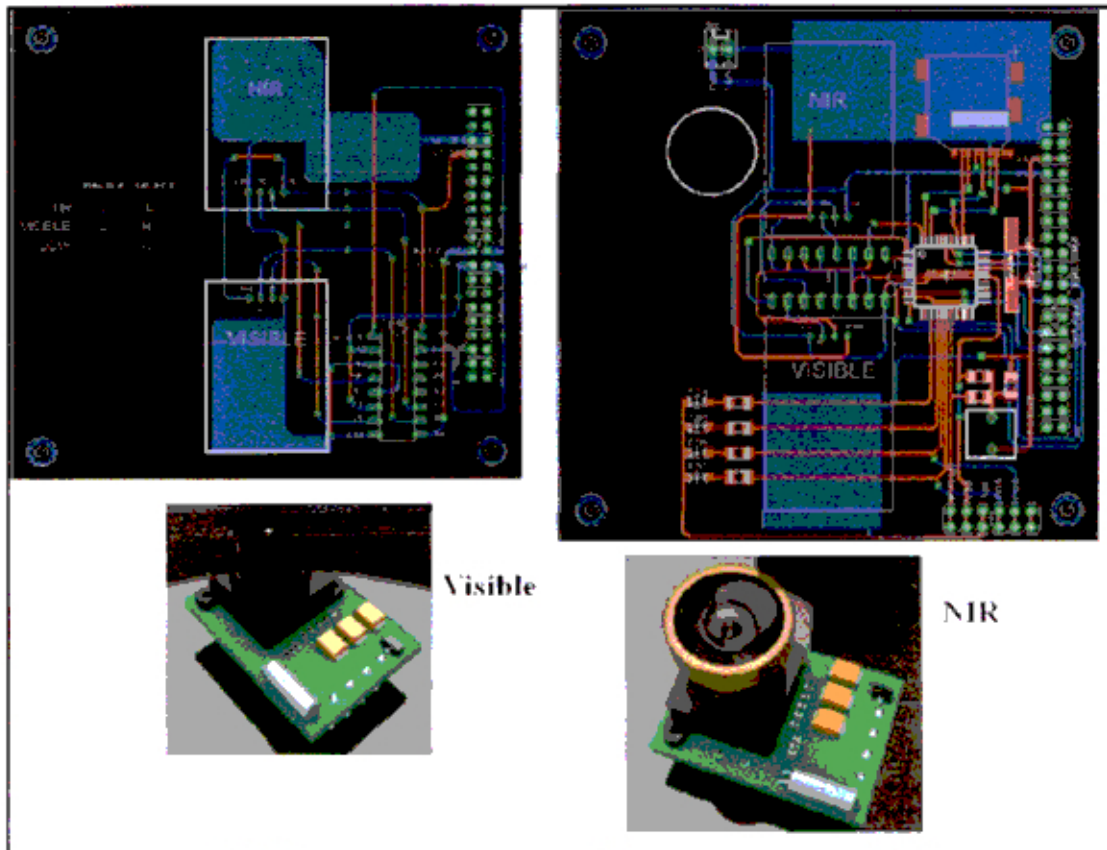


Figura 81. El diagrama esquemático de la izquierda fue el primer diseño implementado. El esquemático de la derecha es el segundo diseño implementado. Ambos diseños deben incluir el control de dos cámaras la 'Visible' y la 'NIR' que se muestra en la figura.

Finalmente el prototipo de vuelo, figura 82, este considera una memoria SD card, un microcontrolador PIC18LF452, un multiplexor, un regulador de voltaje, un MAX 232 diferentes conectores, resistencias, capacitores y un cristal oscilador de 4 MHz. Las funciones que cumple la placa son

- Controlar las dos cámaras: la que fotografía en Visible y la que fotografía en Infrarrojo
- Comunicarse con el módulo CCMI por UART para recibir las órdenes de adquisición de imágenes.
- Comunicarse con el módulo SICOM por I2C para descargar las imágenes almacenada en la SD Card de la placa SIMA hacia el módulo SICOM y su posterior descarga a estación terrena.

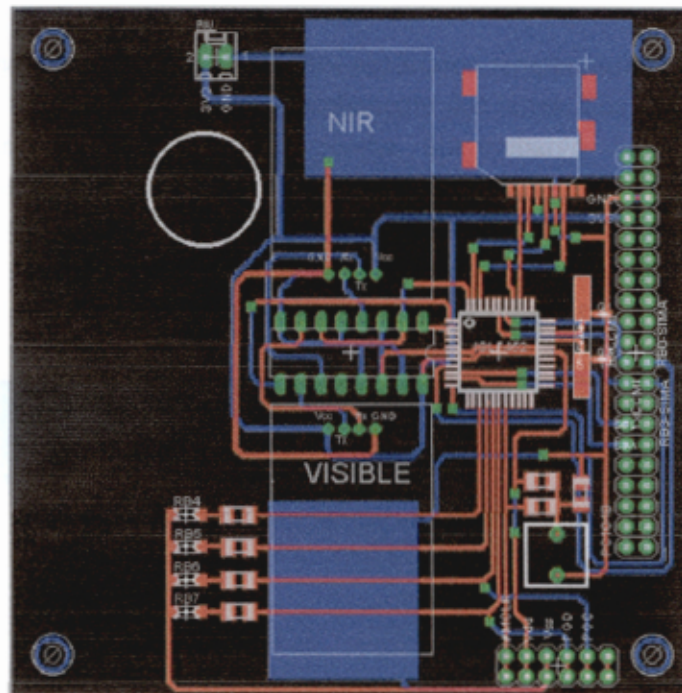


Figura 82. Esquemático de la placa electrónica del prototipo de vuelo.

6.2 Pruebas de Temperatura

Durante la prueba utilizando nitrógeno líquido se logró alcanzar temperaturas menores a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ por el lapso de una hora. El sistema no dejó de funcionar durante todo este tiempo de exposición a bajas temperaturas. Una fotografía adquirida en el interior del contenedor de plástico es mostrada en la Figura 83. Se aprecia el led de color rojo que gracias a la iluminación que proporciona este podemos observar la placa electrónica. La oscuridad es producto de que el sistema se encuentra aislado, pues el contenedor de plástico se encontraba completamente cerrado al igual que la caja de tecnoport.

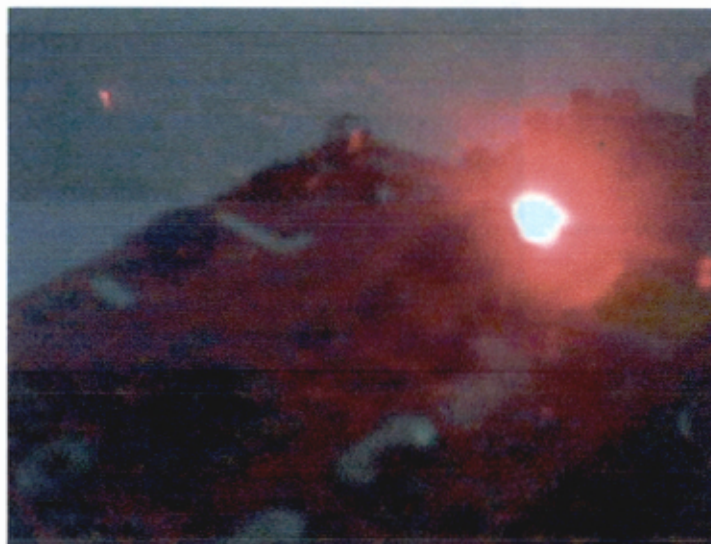


Figura 83. Fotografía adquirida aproximadamente a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

El módulo de cámara y el microcontrolador soportaron temperaturas de $-22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo sometida a esta temperatura por aproximadamente dos horas. Los módulos de cámaras adquirieron imágenes durante toda la prueba. Sin embargo durante el proceso de balance de blancos que tiene el módulo de cámara C328R produce la variación de color que se observa en la figura 84. La cámara al alcanzar el balance de blancos presenta una fotografía sin poder distinguir si la fruta fotografiada está con el Freezer cerrado o abierto. El equipo en ningún momento dejó de adquirir imágenes.

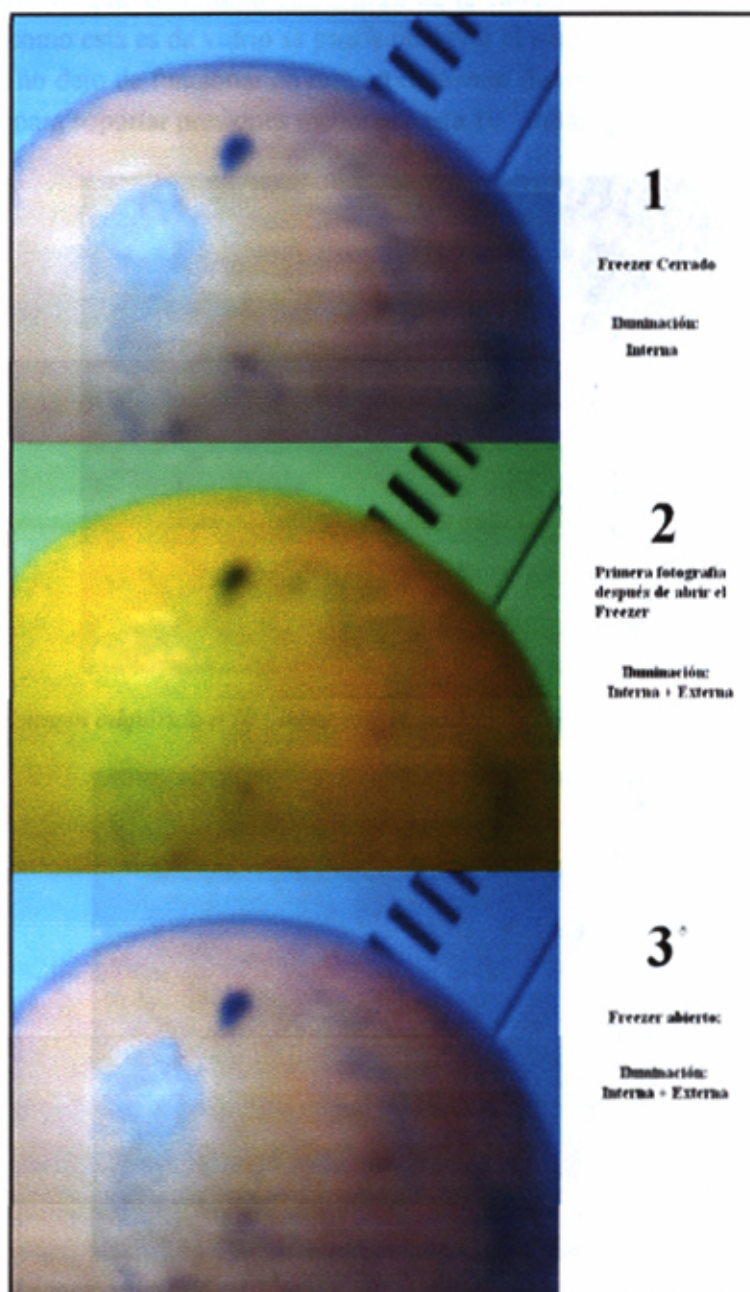


Figura 84. La primera fotografía (1) fue adquirida con el ambiente temperado cerrado, asilado del exterior. Las fotografías (2) y (3) fueron tomadas inmediatamente después de abrir el freezer.

6.3 Pruebas de Presión

El módulo C328R fue sometido a una cámara de generación de vacío. Esto permitió someter al módulo a presiones menores a 1 bar. Llegando hasta la presión de 10^{-2} mbar. Este equipo fue sometido por el tiempo de tres horas a esta presión. Tiempo en el cual no se dejaron de adquirir imágenes con el módulo. Algunas fotografías de esta prueba se pueden observar en la Figura 85 y Figura 86. En la Figura 85 se fotografía una persona, dicha imagen no es nítida y presenta manchas blancas. Este detalle no es de importancia; ya que, el módulo está dentro de la campana y fotografía el interior de la campana, como esta es de vidrio se puede observar el exterior de la campana. El módulo de cámara no dejó de funcionar en ningún momento durante la prueba demostrando una capacidad para soportar presiones menores hasta 10^{-2} mbar aproximadamente.



Figura 85 Imagen adquirida a 10^{-1} mbar con el módulo de cámara C328R.



Figura 86. Imagen adquirida a 10^{-2} mbar con el módulo de cámara C328R.

6.4 Pruebas de Integración

Se adquirieron unas 126 fotografías en aproximadamente una hora durante la primera prueba de integración. A continuación, la Figura 87 muestra 6 fotografías adquiridas el día de la prueba. En esta prueba, los archivos de imágenes adquiridas fueron de una resolución de 320 píxeles x 240 píxeles.

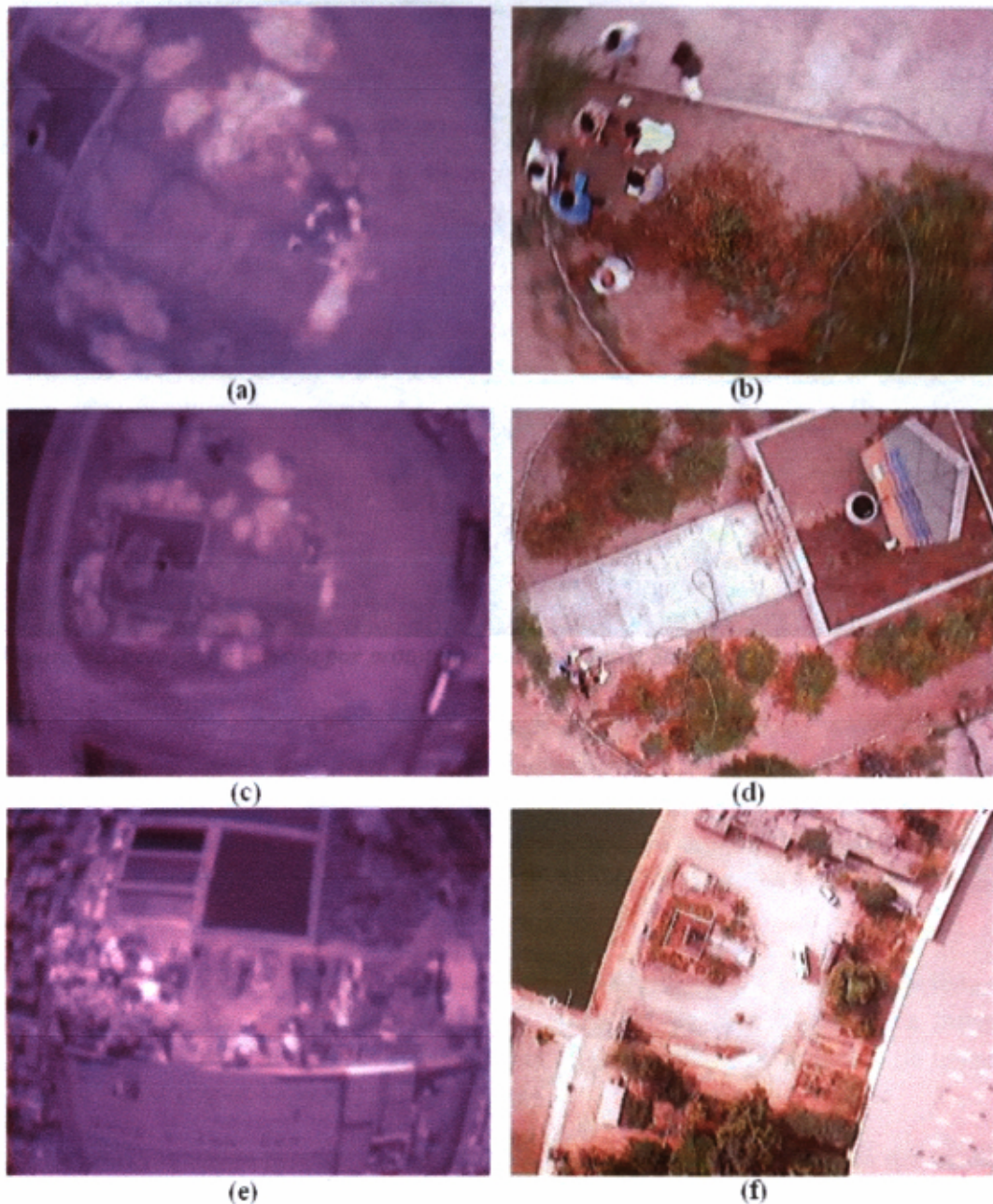


Figura 87. Presentamos algunas fotografías adquiridas en la prueba. Las fotografías a, c y e pertenecen al módulo de cámara C328R-2225 que adquiere imágenes del espectro IR cercano. Las fotografías b, d y f pertenecen a las fotografías del módulo de cámara C328R que adquieren imágenes del espectro visible.

A continuación, se observa las fotografías obtenidas por el prototipo Chasqui-I en la segunda prueba de integración.



Figura 88. Fotografía tomada por prototipo Chasqui-I desde 300 m de altura.

7 Conclusiones y sugerencias para trabajos futuros

7.1 Conclusiones

Se ha desarrollado un sistema electrónico basado en un microcontrolador PIC 18FL452 para el control de las dos cámaras digitales para el Chasqui-I. Se ha realizado la programación de la cámara para la captura de fotos, el cambio de tamaño de foto, el cambio del formato de archivo, el cambio a modo reposo, el cambio de los paquetes de descarga del archivo imagen.

Se ha verificado que el sistema de adquisición de imágenes del Chasqui-I funciona de manera continua a temperaturas menores a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el periodo de una hora. Además, luego de que el sistema ha sido enfriado a temperaturas menores, en el rango de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, y dejar que el sistema de adquisición de imágenes alcance equilibrio térmico con el ambiente, este fotografía con normalidad.

El consumo máximo del módulo SIMA es menor a 70 mA a 3.3 V. en Modo Activo. En Modo Reposo el módulo consume una corriente menor a 1 mA a 3.3 V. En el arranque del sistema, inicio de encendido, el consumo de corriente alcanza los 300 mA, pero es sólo por 20 segundos aproximadamente. Durante la operación del Chasqui-I se pondrá los sistemas en Modo Reposo; de manera que, no se presentará el problema del Modo Inicio.

Se ha verificado que el sistema de adquisición de imágenes del Chasqui-I funciona de manera continua a bajas presiones, pues la placa del módulo funcionó de manera correcta por el lapso de 3 horas. En otras palabras, el sistema fue sometido de manera exitosa a presiones aproximadas de 10^{-2} mbar.

Se verificó el funcionamiento del sistema de adquisición de imagen, placa del módulo SIMA, integrado al prototipo Chasqui-I a una altura de 100 m en la primera prueba de integración (ver Figura 87), y a una altura de 300 m en la segunda prueba de integración (ver Figura 88).

7.2 Sugerencias para trabajos futuros

Diseñar y construir un sistema de óptico con foco variable, para poder generar el zoom fotográfico. En el diseño del sistema de adquisición de imágenes desarrollado el enfoque que se realiza es una vista muy alejado y no se puede hacer un acercamiento de la imagen a fotografiar, es decir, nuestro sistema tiene el enfoque fijo.

Estudiar la posibilidad de usar sensores de imágenes desarrollados con tecnología CCD, ya que, hasta el momento proporcionan una mejor calidad de imagen fotografiada.

9 Bibliografía

- [1] <http://polysat.calpoly.edu/projects.php> consultado el 15/08/2010
- [2] Comunidad cubesat: <http://www.cubesat.org> , o <http://cubesat.atl.calpoly.edu> consultado el 15/08/2010
- [3] <http://www.chasqui.uni.edu.pe> consultado el 15/08/2010
- [4] Cubesat Design Specification Rev 12. The Cubesat Program, Cal Poly SLO. Disponible en: http://cubesat.atl.calpoly.edu/images/developers/cds_rev12.pdf
- [5] <http://www.publico.es/ciencias/181834/cubesat/satelite/elevado/cubo>
https://www.ulpgc.es/hege/almacen/download/7064/7064783/miercoles_10_de_diciembre.pdf consultado el 15/08/2010
- [6] <http://www.quakefinder.com/services/quakesat-ssite/> consultado el 15/08/2010
- [7] http://lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cubesat/index_e.html consultado el 15/08/2010
- [8] <http://www.space.t.u-tokyo.ac.jp/cubesat/index-e.html> consultado el 15/08/2010
- [9] <http://www.utias-sfl.net/nanosatellites/CanXProgram.html> consultado el 15/08/2010
- [10] http://www7.informatik.uni-wuerzburg.de/en/research/research_groups/space_exploration/projects/cubesat/uwe_2/ consultado el 15/08/2010
- [11] www.raumfahrt.fh-aachen.de consultado el 15/08/2010
- [12] <http://www2.units.it/~atmocube/> consultado el 15/08/2010
- [13] <http://www.mineduacion.gov.co/cvn/1665/article-124046.html> consultado el 15/08/2010
- [14] <http://www.raumfahrt.fh-aachen.de/compass-1/home.htm> consultado el 15/08/2010
- [15] <http://www.raumfahrt.fh-aachen.de/compass-1/overview.htm> consultado el 15/08/2010

- [16] <http://www.raumfahrt.fh-aachen.de/compass-1/results.htm> consultado el 15/08/2010
- [17] Dogan Ibrahim. *Advanced PIC Microcontroller Projects in C: From to RTOS with PIC18F Series*. Elsevier. Burlington-USA. 2008. pp 1- 41.
- [18] Schutz, Bernard F. *Geometrical methods of mathematical physics*. Cambridge University Press. Great Britain. 1982. pp 89
- [19] Edited by Malacara, Daniel; *Treatise Editors: Robert Celotta, Judah Levine. Geometrical and instrumental optics (Methods of Experimental Physics; v. 25)*. Academic Press, INC. USA. 1988. pp 59-118
- [20] Robert. E Fischer, Biljana Tadic-Galeb, Paul R. Yoder. *Optical System Design*. McGraw-Hill. Second Edition. USA. 2008. pp 1-28
- [21] Charles Kittel. *Introducción a la Física DEL ESTADO SÓLIDO*. Editorial Reverté, S.A. España. 2003. pp 349 – 351
- [22] <http://www.edmundoptics.com/> consultado el 15/10/2010
- [23] http://www.schott.com/advanced_optics/english/our_products/filters/ consultado el 15/08/2010
- [24] <http://www.edmundoptics.com/onlinecatalog/displayproduct.cfm?productID=1493&search=1> consultado el 15/08/2010
- [25] <http://www.edmundoptics.com/onlinecatalog/displayproduct.cfm?productID=1326> consultado el 15/08/2010
- [26] Hugh D. Young. *Fundamentos de Óptica y Física Moderna*. McGraw-Hill. Colombia. 1970. Pp 128-136.
- [27] Thomas J. Ahrens, editor. *Global earth physics: a handbook of physical constants*. American Geophysical Union. Washington, DC – USA. 2000. pp 351
- [28] Orly Yadid-Pecht and Ralph Etienne-Cummings (Eds.). *CMOS Imagers from phototransduction to image processing*. Kluwer Academic Publishers. USA. 2004. Pp 10, 39 Pp1-51
- [29] Ahmed Nabil Belbachir. *Smart Cameras*. Springer. New York – USA. 2010. Pp 51-96
- [30] Robert L. Boylestad, Louis Nashelsky. *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. Octava Edición. Pearson Educación. México. 2003 pp 903
- [31] Rafael C. Gonzales, Richards E. Woods. *Digital Imaging Processing*. Second Edition. Prentice Hall. New Jersey – USA. 2001. Pp 14 pp 34-45

- [32] Shy Hamami, Leonid Fleshel, Orly Yadid-Pecht. CMOS image sensor employing 3.3V 12 bit 6.3 MS/s pipelined ADC. *Sensor and Actuators A* 135 (2009) 119-125
- [33] M. Bigas, E. Cabruja, J. Forest, J. Salvi. Review of CMOS imagers sensors. *Microelectronics Journal* 37 (2006) 433-451.
- [34] Antonio Pertence Junior. *Amplificadores operacionales y Filtros Activos*. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA S.A. España. 1993. pp 26
- [35] Deborah Sandige. *Digital Infrared Photography Photo Workshop*. Wiley Publishing, Inc. Indianapolis. 2009. Pp 7
- [36] B. E. Bayer, "Color Imaging Array," U.S. Patent 3,971,065, July 20, 1976
- [37] William K. Pratt. *Digital Imaging Processing: PIKS Scientific inside*. 4th Edition. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey. 2007 pp90-126 pp23-44
- [38] Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle. Thomson. *Image Processing, Analysis and Machine Vision*. USA. 2008. Pp 31-41. 694-
- [39] Tinku Acharya, Ping-sing Tsi. *JPEG2000 Standard for Image Compression: Concepts, Algorithms and VLSI Architectures*. Wiley-Interscience. New Jersey – USA. 2005. Pp 55-78
- [40] Deitel & Associates (Harvey & Paul). *C++ How to program*, 6th edition. Pearson Education, inc-Printice Hall. USA. 2008 pp 110-120
- [41] Enrique Palacios Municio, Fernando Remiro Domínguez, Lucas J. López Pérez. *Microcontrolador PIC16F84: Desarrollo de proyectos*. 2^a Edición. Alfaomega. Ra-Ma México. 2006. Pp 127.
- [42] OMNIVISION: OV7620 Single-chip CMOS VGA Color Digital Camera, <http://mxhaard.free.fr/spca50x/Doc/Omnivision/OV7620.pdf>
- [43] C328R: JPEG Camera Module W/UART Interface. <http://www.electronics123.net/amazon/datasheet/C328R.pdf>
- [44] C328-7640 JPEG Camera Module W/UART Interface. <http://www.electronics123.net/amazon/datasheet/C328-7640.pdf>
- [45] Microchip PIC18FXX2 DataSheet High Performance, Enhanced Flash Microcontrollers with 10-Bit A/D. <http://www.farnell.com/datasheets/40378.pdf>
- [46] Secure Digital Cards – Standard Número de Parte SD/2GB, SD/2GB-2P <http://www.kingston.com/flash/securedigital.asp?id=2>
- [47] Eugene Hecht, Alfred Zjac. *OPTICA*. 1977. Fondo Educativo Interamericano, S.A.. pp 106-147

[48] Terminal Equipment and Protocols for Telematic Services: INFORMATION TECHNOLOGY - DIGITAL COMPRESSION AND CODING OF CONTINUOUS - TONE STILL IMAGES - REQUERIMENTS AND GUIDELINES. Recommendation T.81.