

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN
DE IMÁGENES PARA EL PUCP-SAT1**

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

Neils Edison Vilchez Lagos

ASESOR: Hugo Pratt Linares

Lima, marzo del 2014

RESUMEN

En la actualidad el uso de los satélites es variado y destacan las misiones comerciales, científicas y militares. Estos se utilizan en el campo de las telecomunicaciones, en los sistemas de posicionamiento global, en la teledetección, en el campo de la meteorología, en el estudio de la radiación, en la exploración del espacio y muchas más aplicaciones.

Encontramos satélites cada vez más pequeños como los nano y pico-satélites que permiten, a pequeñas empresas y universidades de todo el mundo desarrollar tecnología espacial en los sistemas de energía, de control, de comunicación, diseño estructural, cargas útiles, entre otros como por ejemplo un sistema de adquisición de imágenes.

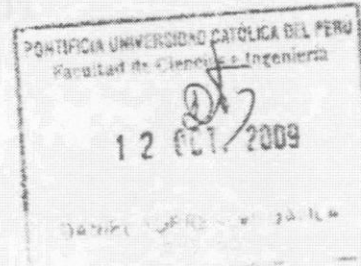
La Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) desarrolla su propia tecnología espacial al elaborar el nano-satélite PUCP-SAT-1, el femto-satélite POCKET-PUCP y otros satélites futuros. La presente tesis tiene como objetivo principal el diseño e implementación de un prototipo de un sistema de adquisición de imágenes, cuyo volumen debe ser menor al de un octavo del volumen de un CubeSat.

Para el desarrollo del sistema se llevará a cabo el análisis del hardware más adecuado para el satélite considerando el entorno de su órbita. Se diseñará e implementará el hardware y software necesarios para lograr la captura de imágenes y almacenarlas en una memoria flash.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño e implementación de un dispositivo de adquisición de imágenes para el PUCP-SAT1
Área : Electrónica # 737
Asesor : Ing. Hugo Pratt Linares
Alumno : Neils Edison Vilchez Lagos
Código : 200272733
Fecha : 6 de octubre de 2009



Descripción y Objetivos

En la actualidad los satélites con misiones de exploración terrestre, meteorológicos, telescopios espaciales, utilizan sistemas de adquisición de imágenes cada vez más avanzados. Los pico-satélites también pueden contar con este tipo de sistemas, aunque de menor envergadura debido a su tamaño reducido.

La captura de imágenes terrestres desde el espacio para su posterior análisis y estudio permitiría obtener información meteorológica; también ayudaría a verificar el desarrollo y buen desempeño de otras partes del sistema como el despliegue de la antena, la comunicación en paquetes y la estabilidad del mismo.

La presente tesis tiene como objetivo principal el diseño e implementación de un sistema de adquisición de imágenes para el pico-satélite PUCP-SAT1; el cual, permitirá la captura de imágenes terrestres desde su órbita.

El desarrollo del dispositivo consta de dos partes: El análisis del hardware más adecuado para el satélite debido al ambiente donde se encontrará; y el diseño e implementación de un primer prototipo del sistema con el cual se realizarán pruebas para conocer en qué condiciones se obtienen las imágenes con mayor nitidez.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
SECCION ELECTRICIDAD Y ELECTRONICA

Ing. ANDRÉS FLORES ESPINOZA
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

CAPÍTULO 1: SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES EN PICO-SATELITES

Título **TECNOLOGÍA**: Diseño e implementación de un dispositivo de adquisición de imágenes para el PUCP-SAT1

Índice

Introducción

1. Sistemas de adquisición de imágenes en picosatélites

2. Requerimientos del sistema a diseñar

3. Diseño del sistema

4. Pruebas y resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. PRUEBA 1: CONSISTE EN LA TOMA DE FOTO Y COMUNICACIÓN CON EL SENSOR DE TEMPERATURA

4.1.1. Captura de foto con la cámara conectada al módulo de desarrollo del satélite... 78

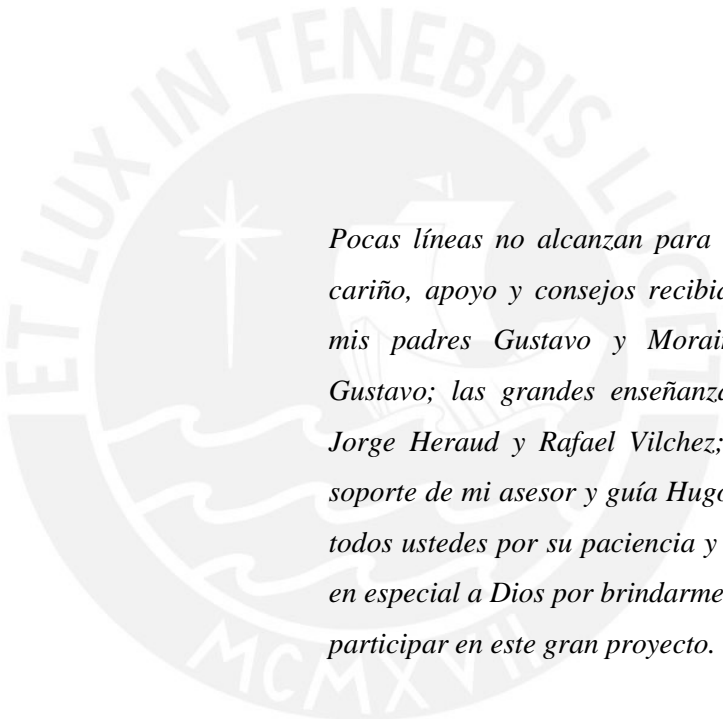
4.1.2. Entorno CrossStudio para MSP430 y la librería EPPS-THIN SD Card 79

4.1.3. Lectura de la temperatura con el sensor conectado al módulo de desarrollo 81

4.1.4. Entorno Total Phase Data Center 82

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
SECCION ELECTRICIDAD Y ELECTRONICA

Ing. ANDRES FLORES ESPINOZA
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

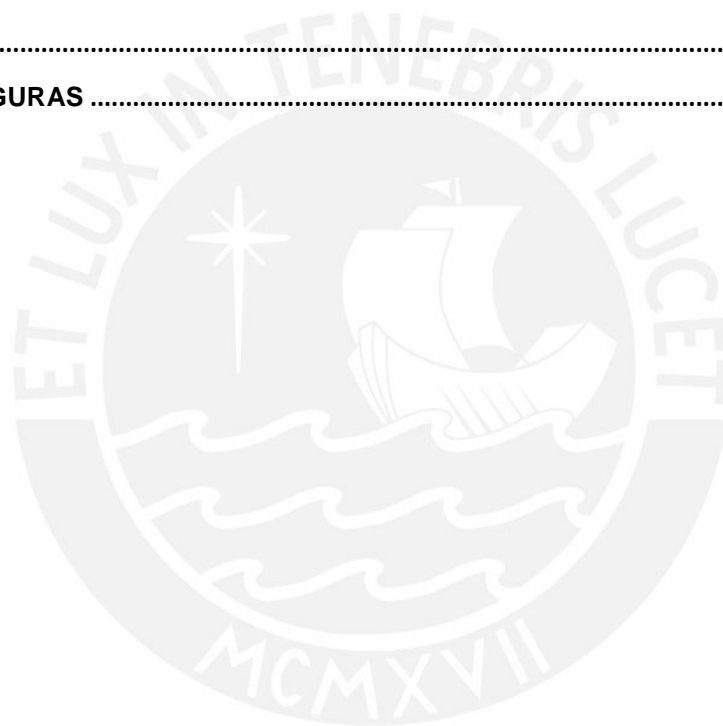


Pocas líneas no alcanzan para agradecer todo el cariño, apoyo y consejos recibidos de mi familia, mis padres Gustavo y Moraima, mi hermano Gustavo; las grandes enseñanzas de mis amigos Jorge Heraud y Rafael Vilchez; la gran ayuda y soporte de mi asesor y guía Hugo Pratt. Gracias a todos ustedes por su paciencia y dedicación, y muy en especial a Dios por brindarme la oportunidad de participar en este gran proyecto.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES EN PICO-SATÉLITES.....	2
1.1 LA TECNOLOGÍA SATELITAL EN EL MUNDO	2
1.1.1 <i>Desarrollo de la tecnología satelital: Pico-satélites.....</i>	6
1.2 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES EN PICO-SATÉLITES	10
1.2.1 <i>Análisis de los problemas</i>	13
1.3 DECLARACIÓN DEL MARCO PROBLEMÁTICO.....	14
CAPÍTULO 2: REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA A DISEÑAR	16
2.1 DISPOSITIVO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	16
2.1.1 <i>Sistema de una cámara digital.....</i>	16
2.2 ESTADO DEL ARTE	19
2.2.1 <i>Presentación del asunto de estudio.....</i>	19
2.2.2 <i>Estado de la investigación.....</i>	27
2.2.3 <i>Síntesis sobre el asunto de estudio</i>	29
2.3 MODELO TEÓRICO	29
2.4 INCONVENIENTES DEL SISTEMA EN ÓRBITA.....	31
CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL SISTEMA.....	32
3.1 OBJETIVOS	32
3.1.1 <i>Objetivo general.....</i>	32
3.1.2 <i>Objetivos específicos.....</i>	32
3.2 ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES CONVENCIONALES	32
3.2.1 <i>Cámaras portátiles.....</i>	33
3.2.2 <i>Cámaras web.....</i>	33
3.2.3 <i>Cámaras de juguete</i>	34
3.2.4 <i>Cámaras de robótica</i>	35
3.2.5 <i>Cámaras de celular.....</i>	36
3.3 CÁMARAS UTILIZADAS EN OTROS SATÉLITES	37
3.4 SENSORES PROPUESTOS PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA.....	39
3.5 DISEÑO DE LOS PROTOTIPOS DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES	42
3.5.1 <i>Diseño del primer prototipo con el sensor HV7131GP.....</i>	42
3.5.1.1 <i>Circuito prototipo para el sensor HV7131GP.....</i>	44
3.5.1.2 <i>Circuito prototipo del microcontrolador con la tarjeta de memoria SD y sensor de temperatura</i>	47
3.5.1.3 <i>Circuito prototipo del buffer para el sensor HV7131GP</i>	49
3.5.2 <i>Diseño del segundo prototipo con el módulo C328-7640.....</i>	53
3.5.2.1 <i>Circuito prototipo para el módulo C328-7640</i>	53
3.6 ELECCIÓN DEL PROTOTIPO MÁS ADECUADO PARA EL SISTEMA.....	59
3.7 DISEÑO DEL SOFTWARE PARA EL PROTOTIPO ELEGIDO	59

CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS.....	74
4.1 PRUEBA 1: COMUNICACIÓN ENTRE EL MÓDULO C328-7640, EL SENSOR TMP100 Y EL MÓDULO DE DESARROLLO DEL SATÉLITE.	74
4.1.1 <i>Comunicación entre los módulos C328-7640 y el de desarrollo del satélite</i>	74
4.2 PRUEBA 2: CAPTURA DE IMAGEN Y MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA UTILIZANDO UN CIRCUITO IMPRESO ELABORADO EN EL INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA.....	78
4.2.1 <i>Resultados obtenidos en la prueba 2</i>	79
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES	98
BIBLIOGRAFÍA	99
FUENTE DE LAS FIGURAS	102



INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la elaboración de satélites ya no es restringida a países desarrollados ni a grandes empresas, esto gracias a la idea innovadora del profesor Robert Twiggs quién diseñó y construyó el estándar CubeSat permitiendo que el tamaño, peso, complejidad y costo de los satélites se reduzcan permitiendo a empresas pequeñas y universidades de todo el mundo desarrollar su propia tecnología espacial.

En la actualidad los satélites con misiones de observación terrestre utilizan sistemas de adquisición de imágenes cada vez más avanzados, con mayor resolución y nitidez. Los pico-satélites también pueden contar con este tipo de sistemas pero con poca profundidad de campo para misiones netamente educativas. La presente tesis se desarrolla con la finalidad de obtener nuevos conocimientos que permitan elaborar tecnología espacial en el Perú.

En el capítulo 1 se describe el uso de los satélites a nivel mundial y de los sistemas de adquisición de imágenes enfocados al área de pico-satélites. En el capítulo 2 se analizan todas las partes que conforman un sistema de adquisición de imágenes; se describen la tecnología de los sensores más utilizados y se hace una comparativa entre ambos; también se muestran las condiciones para la elección de los componentes y se describe la problemática en la ejecución del proceso de captura. En el capítulo 3 se analizan las cámaras que se encuentran en el mercado y se muestran algunas que han sido utilizadas en proyectos espaciales con el objetivo de elegir el sensor con la tecnología más adecuada y los demás componentes para el prototipo. Se describen los diseños de las propuestas del prototipo del sistema y se muestra una comparativa de consumo, costo, complejidad y espacio entre ambas. Finalmente en el capítulo 4 se muestran las pruebas realizadas y los resultados obtenidos con el prototipo elegido.

CAPÍTULO 1: SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES EN PICO-SATÉLITES

El presente capítulo trata sobre la tecnología satelital en el mundo; el desarrollo en la miniaturización de satélites por idea del profesor Robert Twiggs con la creación del estándar CubeSat. Este estándar ha permitido a pequeñas empresas y universidades en todo el mundo desarrollar su propia tecnología espacial.

1.1 La tecnología satelital en el mundo

La tecnología satelital se encuentra en constante desarrollo; empezó en el año 1946 y continúa hasta nuestros días; las áreas de aplicación son variadas destacando las misiones comerciales, científicas y militares. En el área comercial, resalta el campo de las telecomunicaciones como los satélites HISPASAT-AG1 mostrado en la *figura 1.1* y ASTRA entre otros. Los satélites de telecomunicaciones permiten comunicarnos al enviar datos de radio y televisión por redes que se enlazan en el espacio, los satélites retransmiten las señales que son recibidas por distintas estaciones en cualquier parte del mundo. Mediante el sistema de posicionamiento global (GPS) como el NAVSTAR-GPS mostrado en la *figura 1.2* y el sistema TRANSIT, se puede rastrear la ubicación de vehículos en marcha mientras el conductor conoce su posición exacta, la distancia hasta su destino y la dirección en la que se encuentra. En otro campo, como en la teledetección se encuentran los satélites denominados sensores remotos tales como SPOT, ERS 2 mostrado en la *figura 1.3* y LANDSAT, este último de la Agencia espacial norteamericana (NASA). Estos vigilan los recursos naturales de nuestro planeta, detectan las cosechas abundantes y las escasas, permiten conocer el crecimiento de las plantas en cada estación; ayudan a revelar la falta de irrigación como también la detección de plagas, es decir nos dan una perspectiva general de nuestro planeta que nos permite mejorar las cosechas y la distribución de la riqueza. Los satélites meteorológicos tales como TIROS, NIMBUS, GOES, METOP-A mostrado en la *figura 1.4* y una captura mostrada en la *figura 1.5* y METEOSAT, en la *figura 1.6*, nos permiten ver el movimiento de las nubes que revelan la dirección del viento, la formación de tormentas, de tornados; también se puede obtener un mapa de rayos; toda la información obtenida permite predecir el clima y conocer las zonas que serán afectadas por las catástrofes naturales. Los satélites también vigilan los volcanes al detectar las emisiones de magma; estos datos nos dan pistas de futuras erupciones y de los lugares que podrían ser afectados. Pero no sólo las

catástrofes naturales pueden ser observados desde el espacio, sino también las catástrofes ocasionadas por el hombre, como por ejemplo el derrame de un buque petrolero en el mar, se puede seguir el recorrido del petróleo y saber que zonas de la costa serán afectadas; los incendios forestales y la propagación del humo pueden ser observados en su totalidad como también los daños ocasionados. Los satélites también estudian la contaminación atmosférica, relacionado con el nivel de dióxido de carbono que se puede elevar debido a los incendios; también se puede analizar los efectos de la polución causados por los automóviles a nivel global y los gases expedidos por las fábricas. Los satélites revelan el nivel del mar como la temperatura de los océanos, estos datos permiten predecir las tormentas e inundaciones; se puede conocer la cantidad de hielo existente sobre la Antártida y Groenlandia, miden el espesor de la capa de hielo y el tamaño de los icebergs. En el campo científico se puede referir brevemente al estudio del medio espacial, al estudio de la radiación y la utilización de telescopios orbitales para conocer más del universo. En conclusión la tecnología satelital desarrollada ayuda al hombre a obtener una mejor condición de vida y a conocer más de sí mismo.



Figura 1.1: HISPASAT-AG1
Se encargará de brindar servicios multimedia más rápidos en España, Portugal y las Islas Canarias

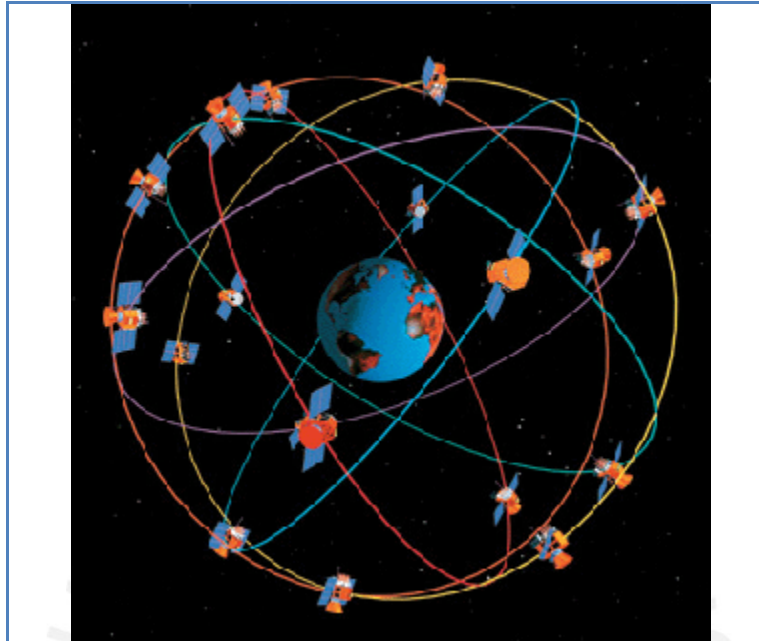


Figura 1.2: NAVSTAR-GPS

Constelación de satélites que permite determinar en todo el mundo la posición de una nave, un vehículo, una persona hasta un objeto con una precisión de centímetros, usando GPS diferencial, aunque lo habitual son unos pocos metros.



Figura 1.3: ERS 2

Incluía experimentos para monitorear el ozono en la atmósfera y el estudio de la tierra, océanos y hielo polar.



Figura 1.4: METOP-A
Se encarga de evaluar la atmósfera global y vigilar el ozono y los gases de efecto invernadero.

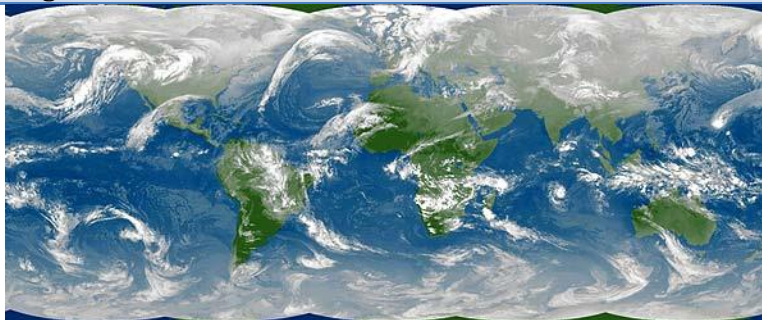


Figura 1.5: IMAGEN captada por METOP-A

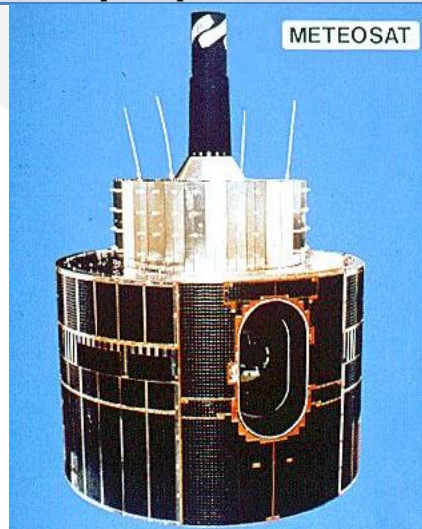


Figura 1.6: METEOSAT
Satélite meteorológico.

1.1.1 Desarrollo de la tecnología satelital: Pico-satélites

Durante varios años la construcción de los satélites artificiales implicaba mucho tiempo, debido al tamaño y la complejidad, esto a su vez representaba mayor peso y costo de financiamiento, es por ello que solo pocos países podían elaborar satélites con sus agencias espaciales como la NASA, la agencia espacial nacional de Rusia (ROSCOSMOS) la agencia espacial europea (ESA), la agencia de exploración aeroespacial japonesa (JAXA), la agencia espacial francesa (CNES), la agencia espacial italiana (ASI), la organización de investigación espacial de la India (ISRO) entre otros. Debido a esta problemática nace la idea de utilizar satélites cada vez más pequeños y se aprovechan los avances en microelectrónica y en la miniaturización de distintos dispositivos tecnológicos. Los avances en la tecnología espacial no solo conllevan el desarrollo de nuevas tecnologías sino también la miniaturización de tecnologías ya existentes. Es por ello que los satélites, como cualquier otro dispositivo electrónico, han reducido su tamaño; lo que implica menor peso, menor tiempo de producción, menor costo de fabricación y lanzamiento, en el cuadro siguiente se muestra su clasificación:

Denominación	Masa (Kg)
Satélites grandes	mayor a 1000
Satélites medianos	entre 500 y 1000
Mini-satélite	entre 100 y 500
Micro-satélite	entre 10 y 100
Nano-satélite	entre 1 y 10
Pico-satélite	entre 0.1 a 1
Femto-satélite	entre 0.01 a 0.1

Esta idea fue desarrollada por el profesor Robert Twiggs, su interés principal es el desarrollo, lanzamiento y puesta en operación de pequeños satélites económicos para demostraciones viables en usos espaciales; también está interesado en el desarrollo de las comunicaciones de estos pequeños satélites para su control y adquisición de datos en ubicaciones remotas de la Tierra, y en la miniaturización de experimentos espaciales para misiones económicas [1]. Es por todo esto que ideó y desarrolló la idea del estándar CubeSat mostrado en la *figura 1.7*, el cual es un pico-satélite de forma cúbica con 10 cm de arista que sigue siendo utilizado hasta el día de hoy por muchas universidades del mundo como Estados Unidos, Canadá, Australia,

Japón, Dinamarca, Noruega, Alemania, Corea del Sur, Holanda, Italia, Rumania, Bélgica, Polonia, Francia, Suiza, España, Turquía, Inglaterra, Colombia y va en aumento [2].

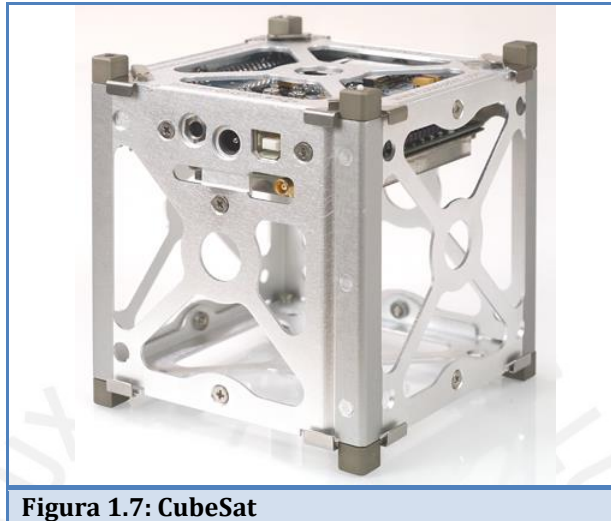


Figura 1.7: CubeSat

Entre algunos satélites que utilizaron este estándar encontramos el AAU mostrado en la *figura 1.8*, el CUTE-I mostrado en la *figura 1.9*, el CANX-1 mostrado en la *figura 1.10*, el UWE-1 mostrado en la *figura 1.11*, el CP4 mostrado en la *figura 1.12*, COMPASS-1 mostrado en la *figura 1.13*, el SWISSCUBE mostrado en la *figura 1.14*, el ITUpSAT-1 mostrado en la *figura 1.15*, NEGAI mostrado en la *figura 1.16* entre muchos otros.

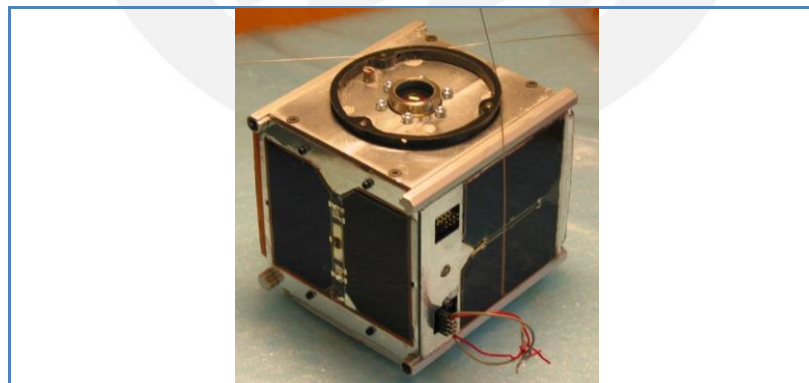


Figura 1.8: AAU CubeSat
Satélite de la Universidad de Aalborg de Dinamarca; fue lanzado el 30 de Junio del 2003

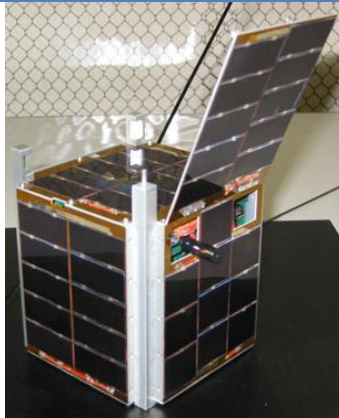


Figura 1.9: CUTE I CubeSat
Satélite del Instituto tecnológico de Tokyo; fue lanzado el 30 de Junio del 2003

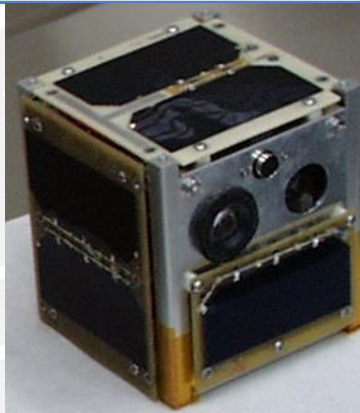


Figura 1.10: CANX-1 CubeSat
Satélite de la Universidad de Toronto de Canadá; fue lanzado el 30 de Junio del 2003

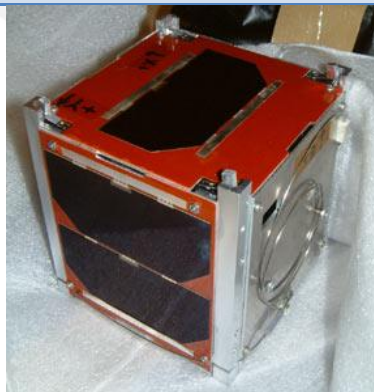


Figura 1.11: UWE-1 CubeSat
Satélite de la Universidad de Würzburg de Alemania; fue lanzado el 27 de Octubre del 2005



Figura 1.12: CP4 CubeSat
Satélite del Instituto Politécnico de California, EE.UU; fue lanzado el 17 de Abril del 2007

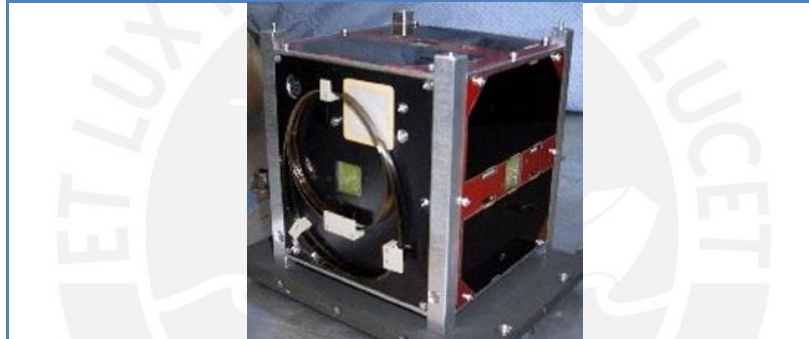


Figura 1.13: COMPASS-1
Satélite de la Universidad de Ciencias Aplicadas de Aachen, Alemania; fue lanzado el 28 de Abril del 2008

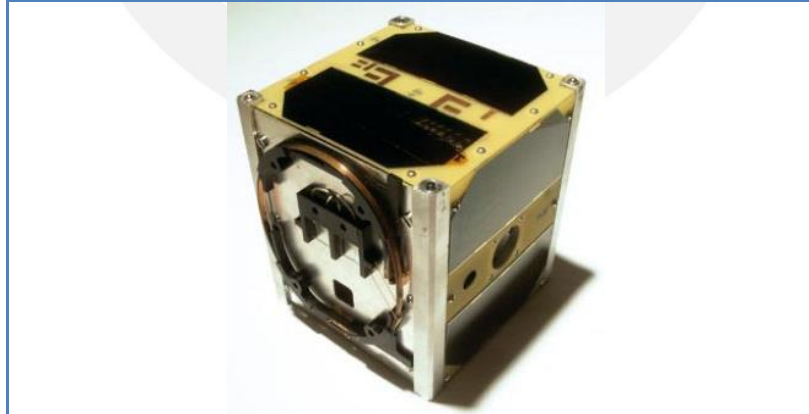


Figura 1.14: SWISSCUBE CubeSat
Satélite de la Politécnica Federal de Lausanne de Suiza; fue lanzado el 23 de Septiembre del 2009

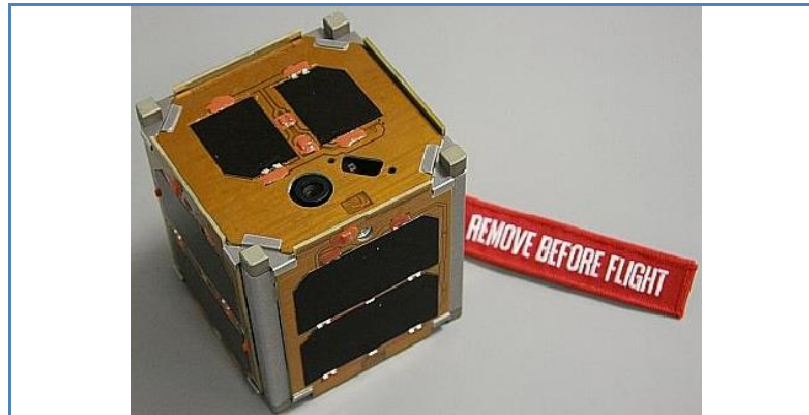


Figura 1.15: ITUpSAT-1 CubeSat
Satélite de la Universidad Técnica de Estambul de Turquía; fue lanzado el 23 de Septiembre del 2009

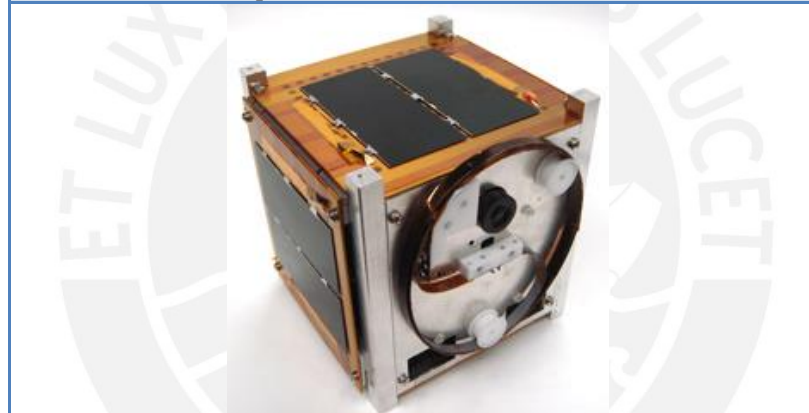


Figura 1.16: NEGAI CubeSat
Satélite de la Universidad de Soka, Tokyo, Japón; fue lanzado el 21 de Mayo del 2010

1.2 Sistema de adquisición de imágenes en pico-satélites

Los pico-satélites cuya misión es la adquisición de imágenes pueden contar con una o más cámaras a color, monocromas y/o multi-espectrales dependiendo del estudio que se desea realizar; su ubicación en la mayoría de los casos es sobre una de las caras del satélite, para ello se debe considerar la ubicación de otras partes del satélite como las antenas, ya que al desplegarse podrían interrumpir la visión, también se debe considerar el volumen que ocupa la tarjeta madre, la tarjeta de energía y la tarjeta de cargas útiles. Respecto al control de la cámara puede ser manual o automático; es decir, manualmente se envían las órdenes desde la estación terrena cuando se encuentra en línea directa con el satélite o automáticamente el microcontrolador de la tarjeta madre o la tarjeta de cargas útiles envían las órdenes para iniciar

la captura. Al final la información queda almacenada en una memoria flash para luego ser enviada a la estación terrena.

Son distintos los sistemas de adquisición de imágenes que se utilizan debido a que cada entidad busca desarrollar su propia tecnología satelital, ya que dicho conocimiento les ayudará a crecer en este campo y les permitirá elaborar futuros satélites en menos tiempo, también les permitirá proveer estos conocimientos al entorno donde se encuentran como es el caso de las universidades. De las entidades que desarrollaron su propio sistema encontramos al Instituto Tecnológico de Tokio, la Universidad de Tokio, la Universidad de Toronto, la Universidad Técnica de Dinamarca, la Universidad de Alborg, la Universidad de Stanford, la Universidad de Illionis, la Universidad de Kansas, la Corporación Aeroespacial de Estados Unidos, el Instituto Politécnico de California, la Universidad de Louisiana, la Universidad del Nuevo Sur de Wales y otras más. Hay nuevas entidades que están desarrollando su propio sistema como la Universidad de Bucharest, la Universidad de Narvik, la Universidad Técnica de Berlín, la Universidad Técnica de Estambul, la Universidad de Michigan, la Universidad de Texas, la Universidad de California, la Universidad Técnica de Munich, entre otras. En la parte 2.2.2 se explicará la utilización de los sensores de imágenes dependiendo del experimento que se quiere realizar.

El PUCP-SAT-1 es un satélite desarrollado por el Instituto de Radioastronomía (INRAS) de la PUCP en el que participan profesores y alumnos, su misión principal es aprender a hacer un satélite y formar profesionales en el campo de la tecnología satelital; el equipo no solo se encarga de la elaboración del satélite sino también del diseño y construcción de las máquinas que permitirán hacer las pruebas de su funcionamiento en condiciones de variación de temperatura, vacío y vibración. La tarjeta de cargas útiles del satélite se encarga de administrar las tareas de adquisición de imágenes de la Tierra, de la estabilización del satélite y del lanzamiento y puesta en órbita del primer femto-satélite de la historia (POCKET-PUCP). El PUCP-SAT-1 tendrá pases con una duración aproximada de 10 minutos, dos veces al día, permitiendo enviar y recibir información en la banda de VHF a una frecuencia de 144.20MHz como se representa en la *figura 1.17*.

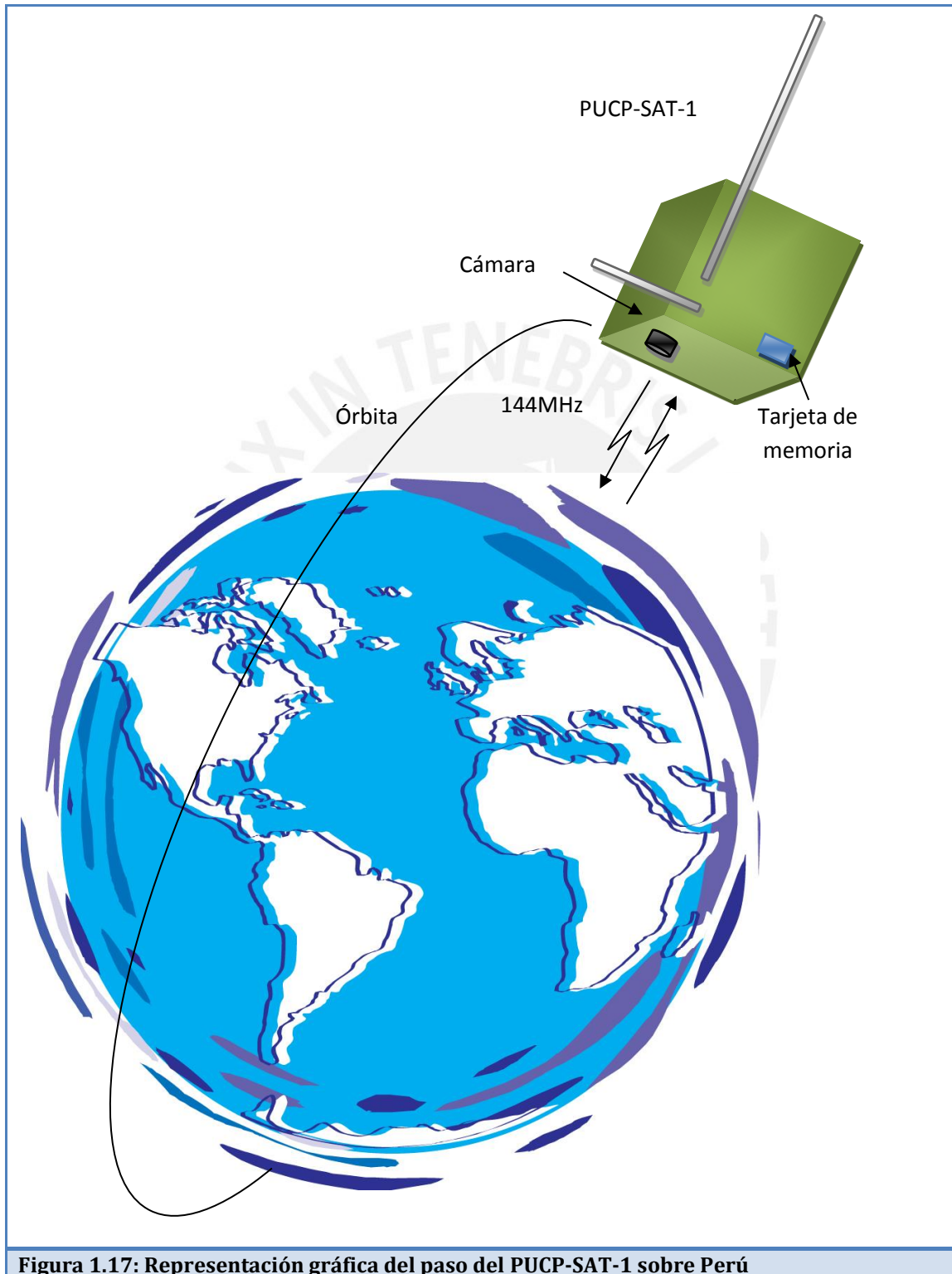
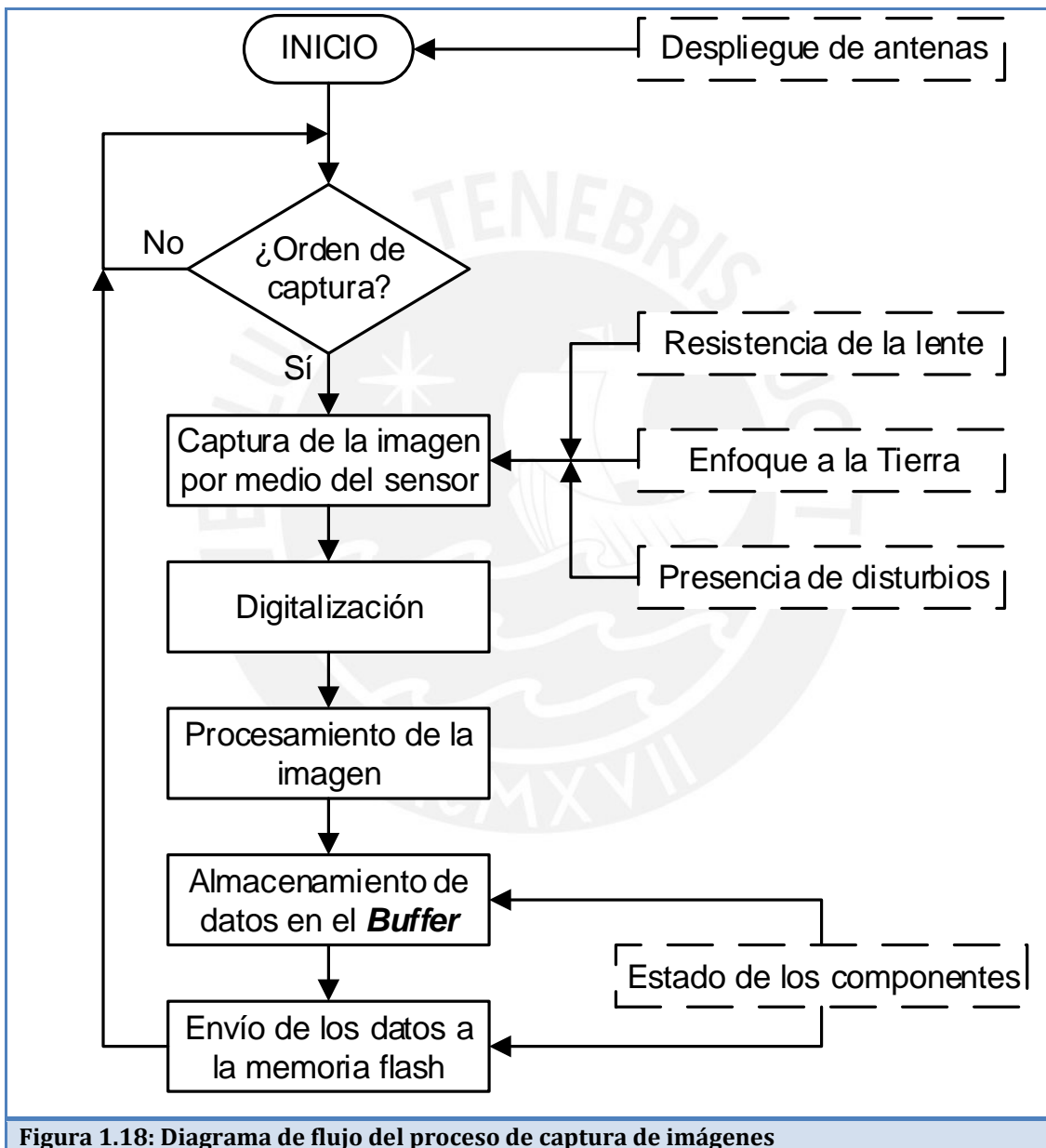


Figura 1.17: Representación gráfica del paso del PUCP-SAT-1 sobre Perú

1.2.1 Análisis de los problemas

Durante el proceso de la captura de imágenes pueden ocurrir distintos problemas como se muestran en la *figura 1.18*.



Una comunicación estable entre la estación terrena y el satélite es vital para su control, para ello las antenas tienen que estar desplegadas y el sistema de comunicación no debe sufrir ningún daño debido a los rayos cósmicos; en caso el control de la cámara sea manual las

ordenes se transmitirán desde la base en tierra a una frecuencia en la banda VHF, la misma en la que se recibirá la información del satélite.

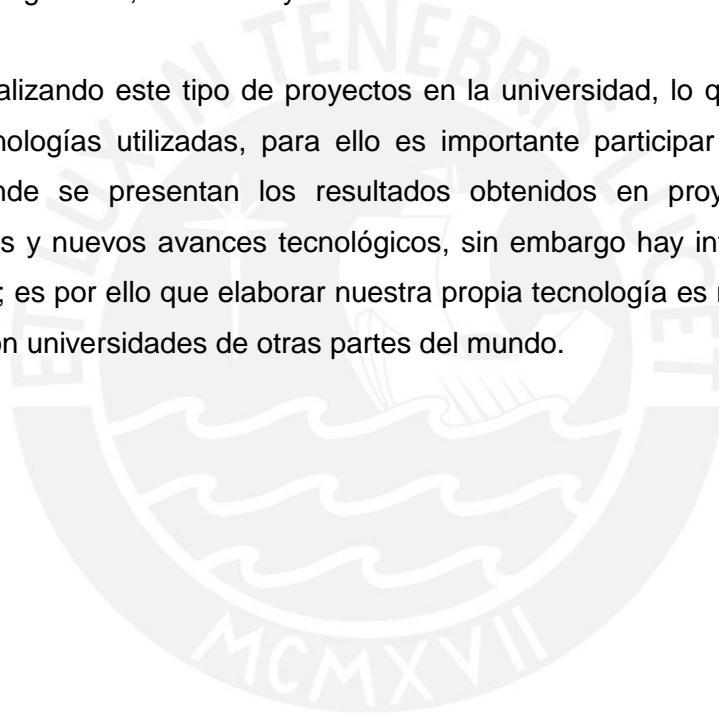
Otro punto importante para obtener una buena imagen es el estado de la lente, debe soportar un rango de temperaturas de -40 a 85°C para evitar su deterioro, la deformación de la lente produciría que la luz se direcciona a un punto distinto al del sensor. El satélite debería estar estabilizado apuntando a la Tierra; es decir, no debería girar sobre ninguno de sus ejes cartesianos porque el movimiento del satélite se vería reflejado en la nitidez de la imagen. Toda la electrónica del sistema podría dañarse por la presencia de rayos cósmicos, ya que estos afectan a los transistores internos, podrían cambiar el nivel lógico en algún bit en la etapa del almacenamiento, también se podrían dañar los píxeles del sensor y no se obtendría información de dicho píxel al momento de la captura de la imagen, podría cambiar el software almacenado en la memoria interna del microcontrolador, entre otros; para evitar que esto suceda o impedir que ocurra a corto plazo se necesita proteger la electrónica con materiales como el berilio, un material difícil de conseguir, otra muy buena opción y la más utilizada es el aluminio, también el kapton es muy utilizado para cubrir todas las tarjetas y paneles solares de los satélites.

1.3 Declaración del marco problemático

El mayor inconveniente para poder realizar un proyecto satelital es la adquisición del capital para su desarrollo, ya que, como en todo proyecto, hay costos de producción. Estos costos abarcan desde la adquisición de componentes electrónicos para la elaboración de la tarjetas hasta el costo de lanzamiento del satélite a una determinada órbita; sin embargo también se presentan otros problemas por ser un proyecto nuevo en el Perú, debido a que la tecnología necesaria para su desarrollo se encuentra en el extranjero y en algunos casos no es posible poder comprar algunos componentes como el caso de las celdas solares; esto conlleva aprender a usar dicha tecnología, sin embargo, en la mayoría de los casos las empresas mantienen en reserva información que nos permitiría desarrollar nuestra propia tecnología debido a que para algunas compañías, la tecnología satelital, se ha vuelto un negocio. Es necesario contar con instalaciones que nos permitan cumplir con los requerimientos de trabajo en el desarrollo del satélite; para poder manipular la electrónica se necesita de un cuarto limpio donde se almacenarán todos los componentes del satélite, este ambiente de trabajo se encuentra en el Instituto de Radioastronomía de la PUCP y es de clase 1000.

Otro factor a tomar en cuenta es durante el lanzamiento del satélite, tanto el cohete como el dispositivo encargado de eyectar el satélite, conocido como lanzadera, por ejemplo el Poly-Lanzador orbital de pico-satélites (PPOD), no deberán presentar ningún desperfecto durante la abertura de la tapa y la eyección del satélite. No se conoce los daños que ocasionarán los rayos cósmicos a la electrónica ni el rango de temperaturas en el que se encontrará el satélite, solo se estima un rango probable de -40°C a 85°C . Esto a la larga conlleva al aprendizaje y puesta en marcha de tecnología espacial peruana; posiblemente sea un impulso para la creación de nuevas carreras de ingeniería, maestrías y doctorados como sucede en el extranjero.

Se busca seguir realizando este tipo de proyectos en la universidad, lo que implica mejorar e innovar en las tecnologías utilizadas, para ello es importante participar en las conferencias internacionales donde se presentan los resultados obtenidos en proyectos similares, los proyectos planeados y nuevos avances tecnológicos, sin embargo hay información restringida para su distribución; es por ello que elaborar nuestra propia tecnología es necesaria para poder entrar a competir con universidades de otras partes del mundo.



CAPÍTULO 2: REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA A DISEÑAR

El presente capítulo trata sobre el estado de investigación de distintos sistemas de adquisición de imágenes en la actualidad, algunos conceptos básicos de las partes que componen el sistema en general, así como también el modelo teórico.

2.1 Dispositivo de adquisición de imágenes

Tiene la capacidad de capturar imágenes convirtiendo la luz en señales que pueden ser almacenadas. El medio de almacenamiento puede ser un rollo de película fotográfica, donde las señales que almacena son químicas, como también una memoria donde las señales son eléctricas.

2.1.1 Sistema de una cámara digital

Tomando como ejemplo el sistema de una cámara fotográfica digital (DSC), se seleccionarán las partes más importantes para poder capturar una foto.

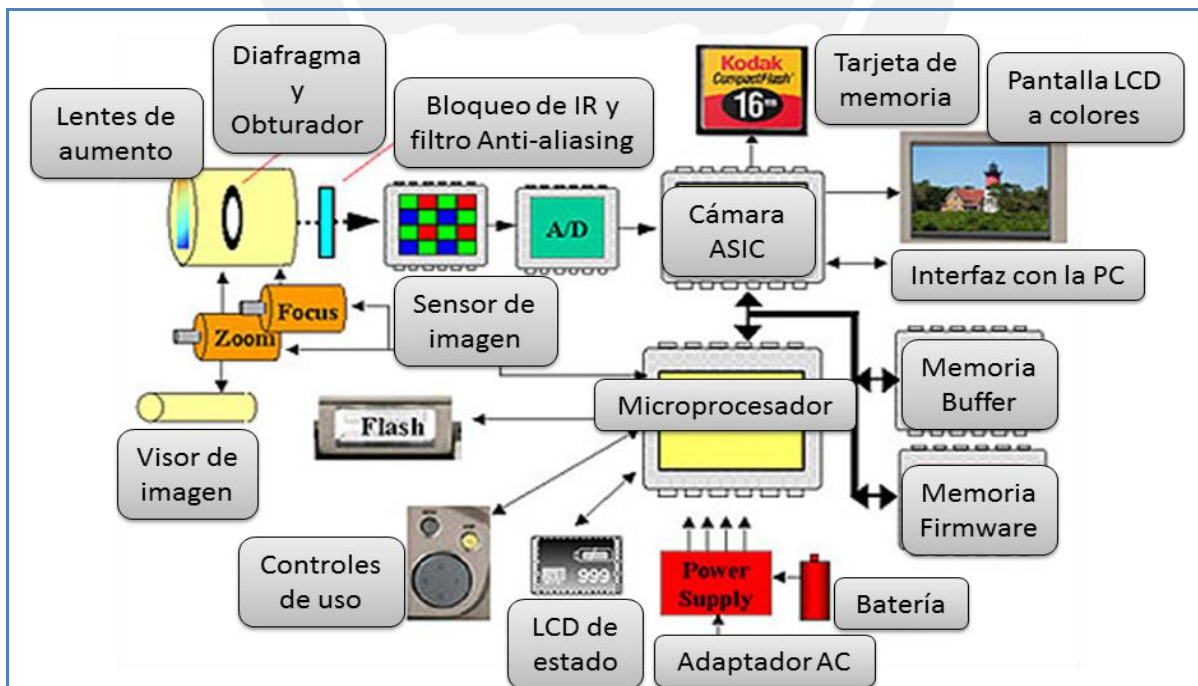


Figura 2.1: Diagrama de una cámara portátil con todas sus partes

De todas las partes de la cámara se seleccionan la menor cantidad para su funcionamiento, las cuales se muestran a continuación:

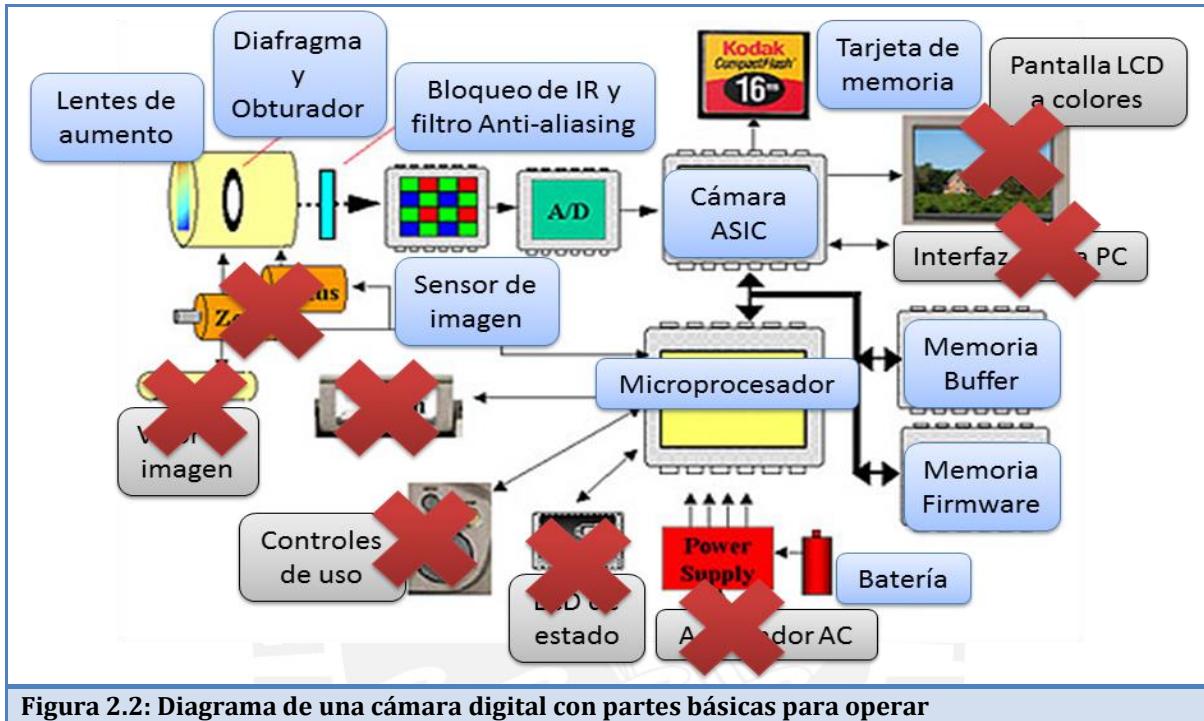


Figura 2.2: Diagrama de una cámara digital con partes básicas para operar

Por lo tanto el diagrama de bloques del sistema a utilizar es el siguiente:

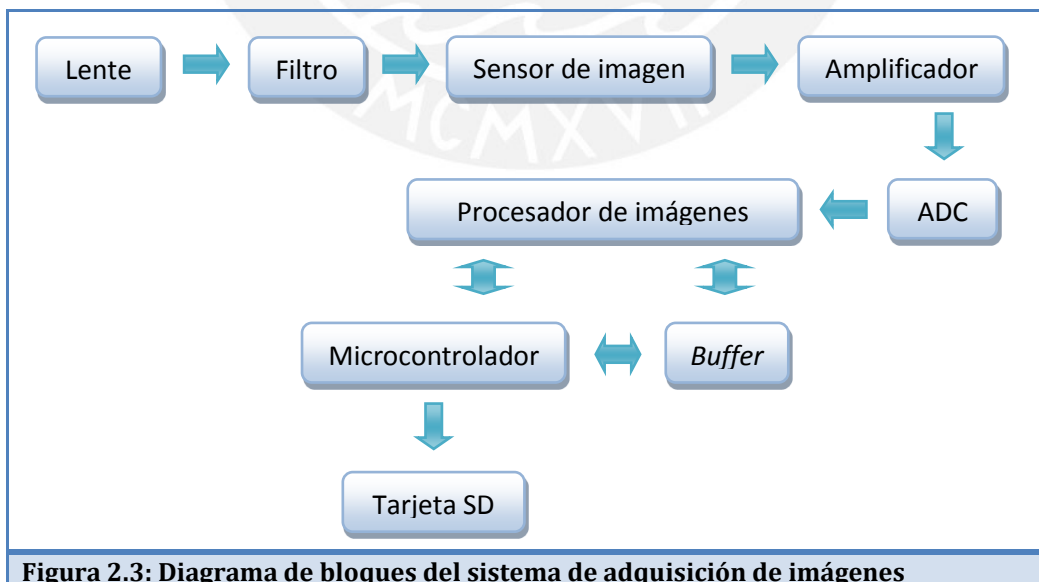


Figura 2.3: Diagrama de bloques del sistema de adquisición de imágenes

Se describe a continuación cada uno de los bloques:

Lente: La parte óptica consiste en una lente, la cual direcciona la luz a través de un filtro al sensor de imagen.

Filtro: El filtro se encarga de darle color a la imagen. Existen varios tipos de configuraciones como Bayer o CMY. El diseño Bayer consiste en un conjunto de filtros verdes, rojos y azules ordenados en la proporción 2:1:1 mientras que el diseño CMY consiste en un conjunto de filtros cian, magenta y amarillo en la proporción 1:1:2.

Sensor de imagen: Es un dispositivo sensible a la luz que tiene la capacidad de convertir una imagen óptica en pulsos eléctricos de distinta intensidad en función de la cantidad de luz que recibe.

Amplificador: Es un circuito que proporciona a su salida una réplica amplificada de la señal aplicada a su entrada, conservando toda la información fundamental de ésta.

ADC: Es un circuito electrónico que convierte una entrada analógica en una señal digital.

Procesador de imágenes: Esta labor la realiza usualmente los dispositivos de procesamiento digital de señales (DSP), los que se encargan del control de la auto exposición (AE), auto enfoque (AF), balance automático de blancos (AWB) y del colorido de la imagen como la corrección del sombreado de lentes, interpolación del color, corrección del color, nivel de compensación de negro, corrección del pixel, corrección gamma, compresión y descompresión de la imagen entre otros.

Microcontrolador: Se encarga de enviar las señales de control al sensor y de enviar la información de salida a una unidad de almacenamiento.

Buffer: Es una memoria RAM, la información se almacena temporalmente.

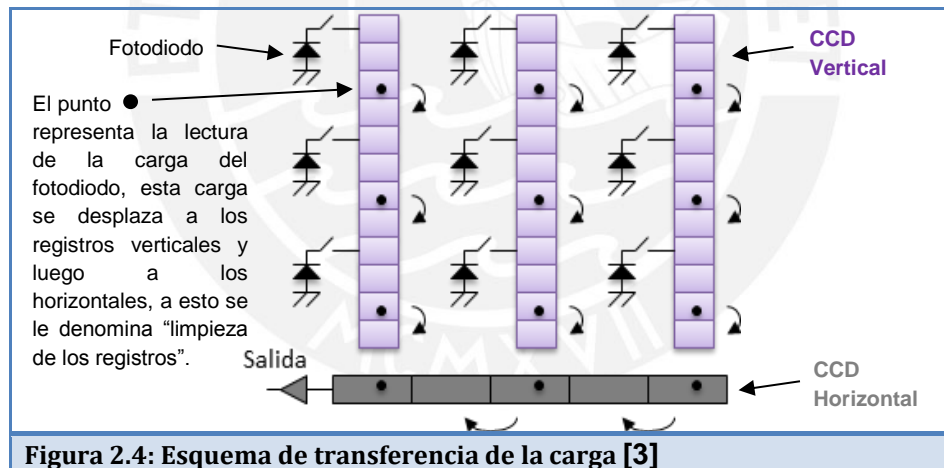
Tarjeta de memoria SD: Es una memoria Flash, donde la información se almacena permanentemente.

2.2 Estado del Arte

2.2.1 Presentación del asunto de estudio

Entre los sensores de imágenes más conocidos encontramos las tecnologías de Dispositivo de Carga Acoplada (CCD) y Semiconductor complementario de óxido de metal (CMOS) que se diferencian por su arquitectura, básicamente en como escanean la información del sensor.

Un sensor de imagen con tecnología CCD acumula carga en cada fotodiodo del arreglo de píxeles dependiendo del tiempo de exposición y se dirigen a un nodo de salida, las cargas se transfieren a los registros verticales (**CCD Vertical**) que actúan como memorias analógicas, para después transferirlas a los registros horizontales (**CCD Horizontal**) que se encuentran en la parte inferior y al final son enviados al amplificador de salida que la convierte en una señal de voltaje como se muestra en la *figura 2.4.* [3] y [4].



La tecnología CCD presenta tres tipos de arquitecturas como se observa en la *figura 2.5:* las cuales son FTCCD (Transferencia de cuadro CCD), ITCCD (Transferencia Interlineal CCD) y FITCCD (Transferencia de cuadro interlineal CCD). El primero y el tercero presentan problemas como apariciones de manchas causados por la sobreexposición de luz denominado "smear", esto no se da en el ITCCD ya que cuenta con un blindaje para la luz, por tal motivo es el más utilizado en las cámaras digitales y de video. Esta arquitectura tiene dos formas de escanear la imagen [3].

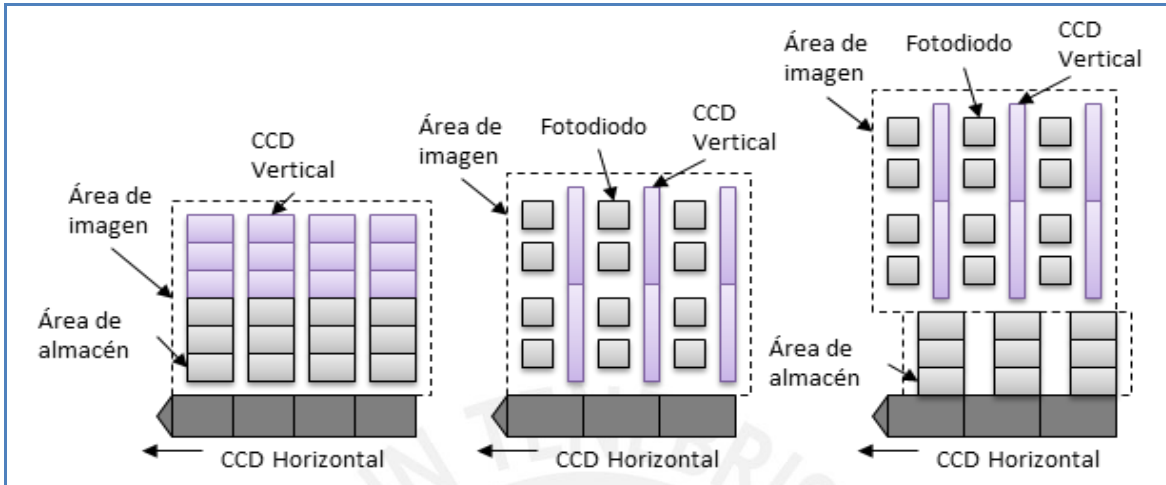


Figura 2.5: Tres tipos de sensores CCD. Al lado izquierdo arquitectura FTCCD, al medio arquitectura ITCCD y al lado derecho arquitectura FITCCD [3]

La primera es el escaneo entrelazado, inicialmente se transfieren las cargas de los fotodiodos de las filas impares y luego de las pares como se observa en la figura 2.6.

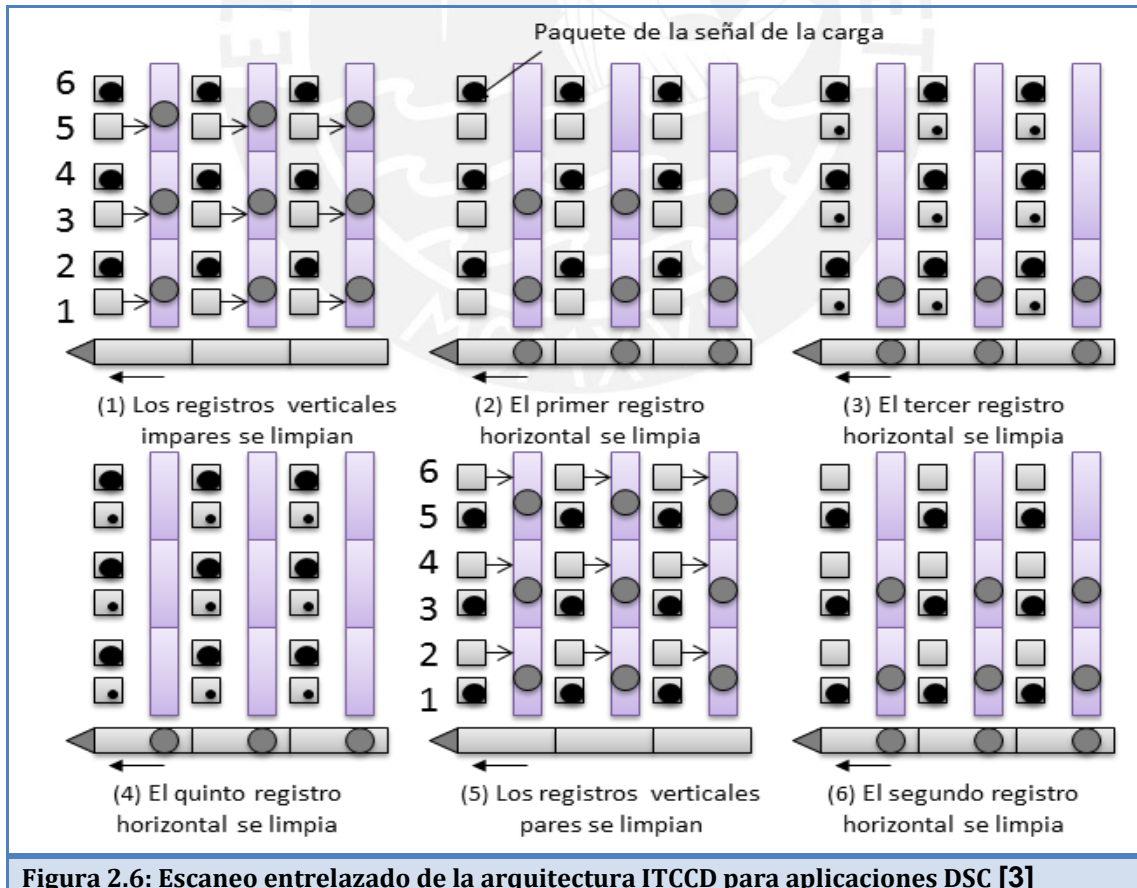
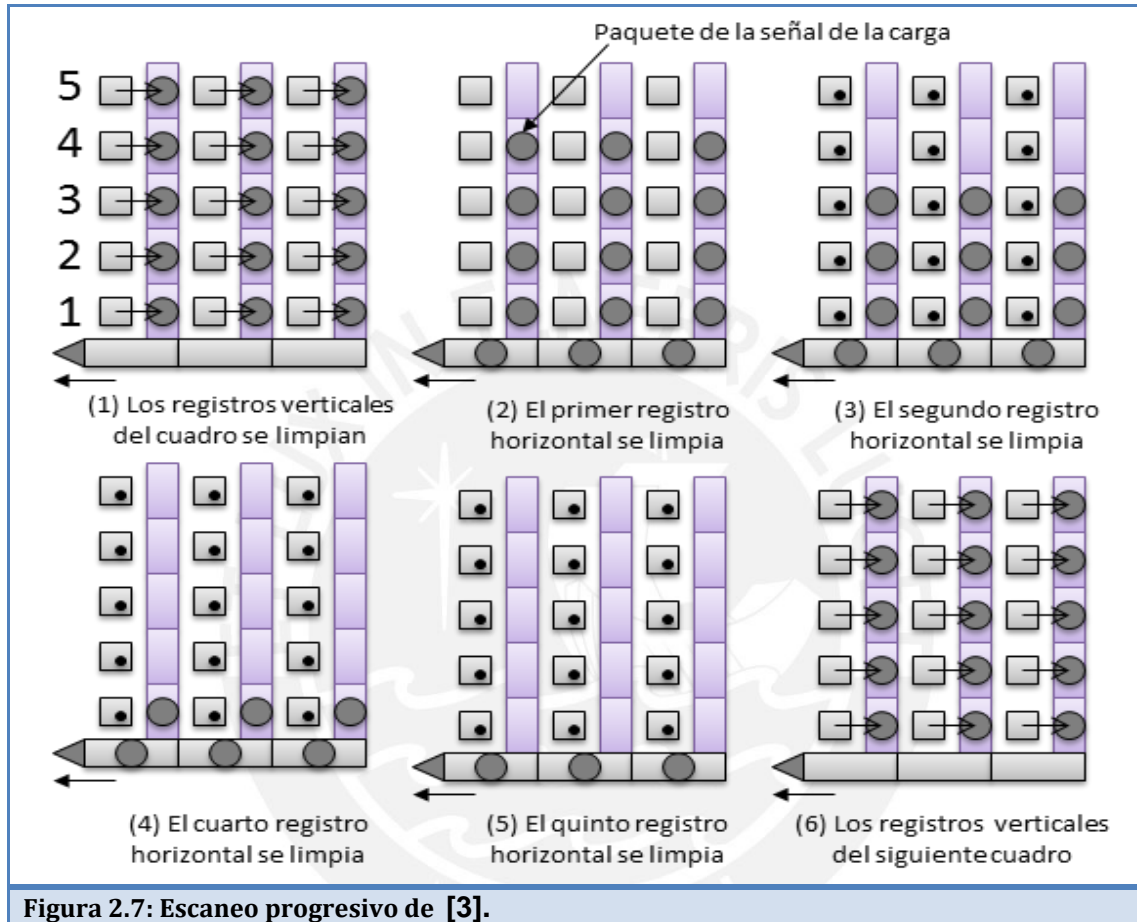


Figura 2.6: Escaneo entrelazado de la arquitectura ITCCD para aplicaciones DSC [3]

Y la segunda es el escaneo progresivo en el que se transfieren todas las cargas de los fotodiodos en forma simultánea como se muestra en la *figura 2.7*.



Un sensor de imagen con tecnología CMOS consiste en un arreglo de píxeles activos que constan de tres transistores y un amplificador; una vez convertida la luz en señales de tensión o corriente, las cargas acumuladas de los píxeles deben ser dirigidas a un nodo de salida y esto se logra mediante un esquema de direccionamiento X-Y. Este direccionamiento consiste en un escáner vertical (un registro de desplazamiento o un decodificador) que selecciona una fila Y_j y un escáner horizontal que selecciona una columna X_i del arreglo de píxeles para leer la señal eléctrica [3]. En la *figura 2.8* se muestra el direccionamiento X-Y con un arreglo de píxeles cuyo circuito puede ser representado con un fotodiodo, un interruptor de reinicio de fotodiodo, una señal de amplificación y una salida.

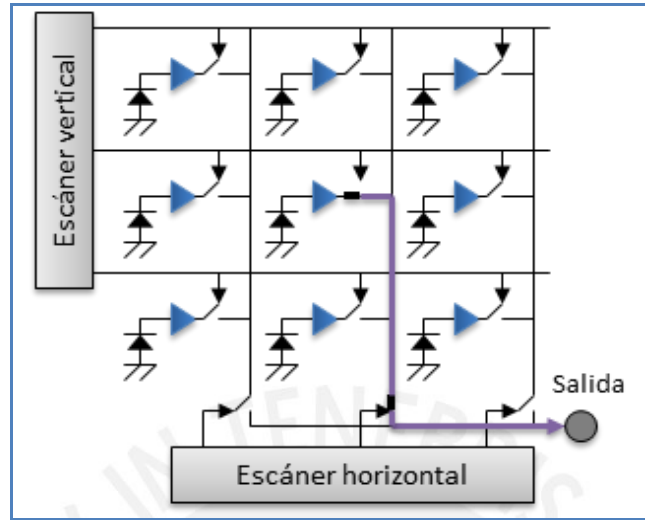


Figura 2.8: Esquema de direccionamiento X-Y [3]

En la tecnología CMOS encontramos tres tipos de arquitecturas: el sensor de imagen con salida análoga, con salida digital y el tipo sistema en un chip (SOC) que integra funciones del procesamiento de imágenes como se aprecia en la figura 2.9. La integración de las partes en un chip “On-Chip” añade el conversor análogo digital (ADC) y el procesamiento de señales de imágenes (ISP) que permite el control de la exposición de la luz, el control de la ganancia, el balance de blancos, la interpolación de color, entre otros, sin embargo el procesamiento depende de las aplicaciones DSC que se necesiten y difieren entre las cámaras de juguete, las cámaras de clase media y las cámaras profesionales (SLR). [3].

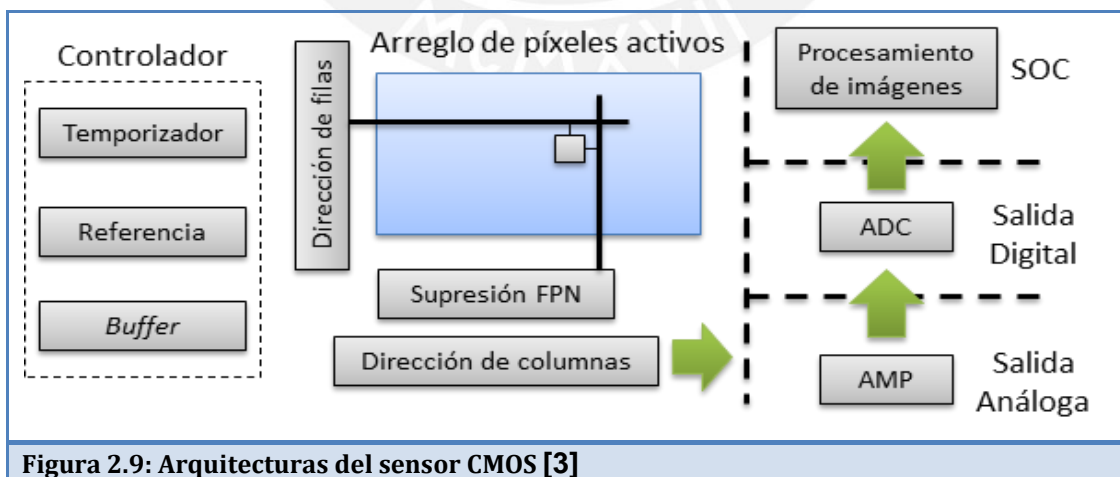
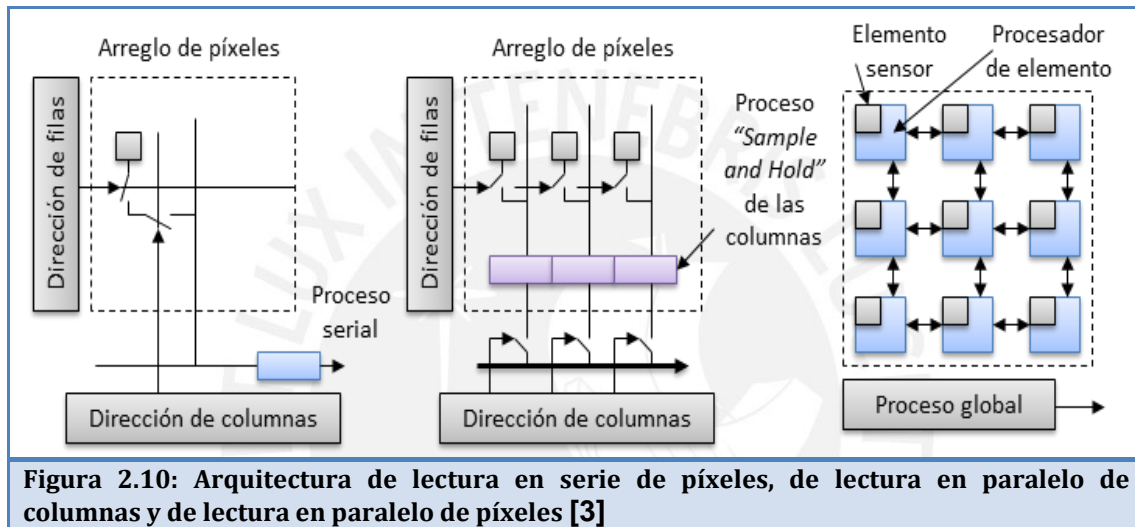


Figura 2.9: Arquitecturas del sensor CMOS [3]

Encontramos tres arquitecturas de direccionamiento en la tecnología CMOS, estos se clasifican dependiendo de cuantos píxeles son leídos y procesados en simultáneo, son los siguientes:

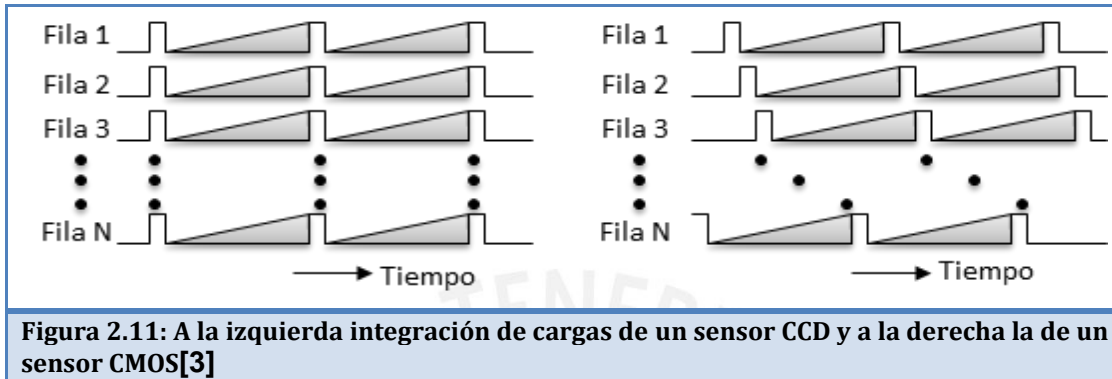
arquitectura de lectura en serie de píxeles, de lectura en paralelo de columnas y de lectura en paralelo de píxeles como se muestra en la *figura 2.10*. La segunda es la más popular en sensores CMOS ya que consiste en obtener las cargas de los píxeles (*integración de cargas*) fila por fila, lo que reduce la variación constante de las líneas del bus de direccionamiento, esto a su vez permite utilizar frecuencias más bajas para direccionar las columnas lo que se resume en un bajo consumo de energía.



Las diferencias entre ambos sensores radican en lo siguiente: 1) El consumo de energía debido a la tecnología de cada uno y a la transferencia o direccionamiento de las cargas de los píxeles hacia el nodo de salida. 2) La diferencia de tiempo en la integración y lectura de las cargas. 3) En la integración de sus partes. A continuación se explicará más a detalle sobre estas diferencias.

Entre ambas tecnologías la CCD está altamente especializada por tener más tiempo en el mercado, sin embargo la tecnología CMOS se caracteriza por su bajo consumo de energía que va desde un 50% a un 10% del consumo de un sensor CCD, debido a la estructura del píxel, al direccionamiento X-Y en el que se tiene la versatilidad de activar sólo los píxeles deseados a diferencia de la transferencia de carga de los CCD; si se incrementa el tamaño del sensor el consumo en los sensores CMOS no se afectaría significativamente pero sí en los sensores CCD. Por lo general la arquitectura ITCCD requiere tres fuentes de alimentación diferentes como -8V, 3V y 15V mientras que para la tecnología CMOS solo requiere una fuente entre 2.5V a 3.3V [3].

El tiempo de integración de las cargas es distinto en el escaneo progresivo del CCD y en la arquitectura de lectura en paralelo de columnas del CMOS mostrados en la *figura 2.11*.



El escaneo progresivo permite leer todos los píxeles de todas las filas al mismo tiempo, mientras que la lectura en paralelo de columnas del arreglo de píxeles se leen fila por fila. Es por ello que el consumo en los sensores CCD es mayor, una característica importante es que tiene mejor relación señal/ruido (SNR) ya que cada píxel puede absorber mayor cantidad de luz. En caso se capture una imagen en movimiento al utilizar el escaneo progresivo la imagen se vería nítida y sin distorsión por que se leen todos los píxeles, es por ello que es el más utilizado en aplicaciones DSC; si se utiliza el escaneo entrelazado se observaría una superposición de imágenes debido a que la captura se realiza en dos instantes de tiempo distintos, por tal motivo es el más común en formatos de video NSTC y PAL y si se utiliza un sensor CMOS se observaría una inclinación en la imagen ya que la captura se realiza en instantes de tiempo distintos como se observa en la *figura 2.12*, sin embargo el efecto borroso de la imagen “smear” no se observa en los CMOS.



Figura 2.12: A la izquierda imagen captada con un sensor CMOS con arquitectura de columnas en paralelo, al centro imagen captada por un sensor CCD con escaneo entrelazado sin disparador mecánico y a la derecha imagen captada con un sensor CCD con escaneo progresivo sin disparador mecánico[3].

Para el funcionamiento del sensor CCD, este requiere un conversor análogo-digital y la parte de procesamiento de la imagen como se observa en las *figuras 2.13 y 2.14*.

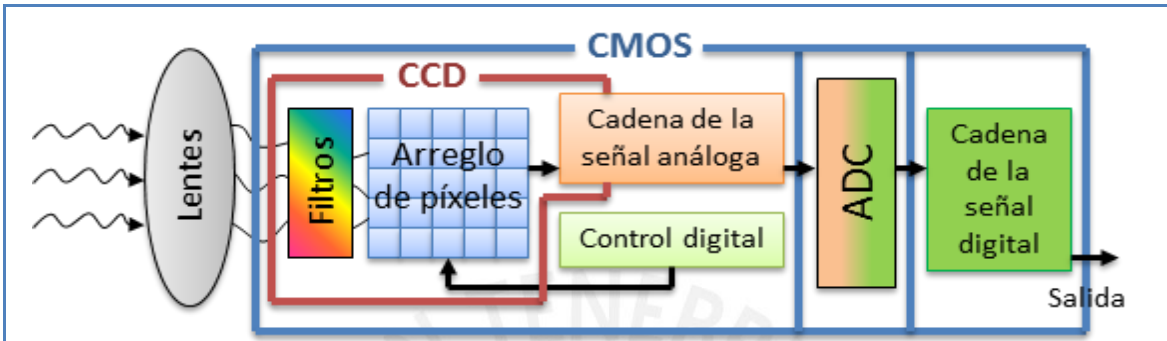


Figura 2.13: Los sensores CMOS con arquitectura “On-chip” integran un ADC y el procesamiento de la imagen [5].

Compact camera system thanks to original SHARP mounting technology

To achieve a compact camera system, SHARP provides a system in combination with peripheral LSIs, such as DSP, timing generator, CDS/PGA/ADC and V driver, together with image sensor, thanks to the employment of original SHARP mounting technology. In addition, a varied lineup of camera modules which integrate an image sensor, a lens and peripheral LSIs are fully developed and can contribute to making cellular phones compact.

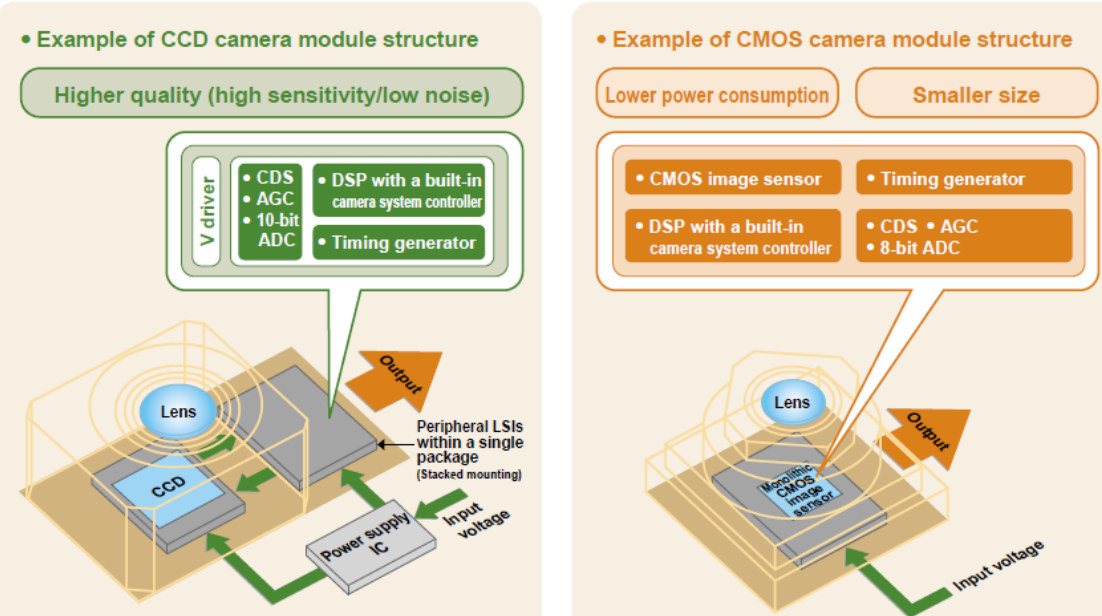


Figura 2.14: Módulos CCD y CMOS de la empresa SHARP utilizados en celulares [6].

Siguiendo el diagrama de bloques propuesto y conociendo las partes que integran los sensores de ambas tecnologías, el diagrama se reduce como se muestra a continuación.

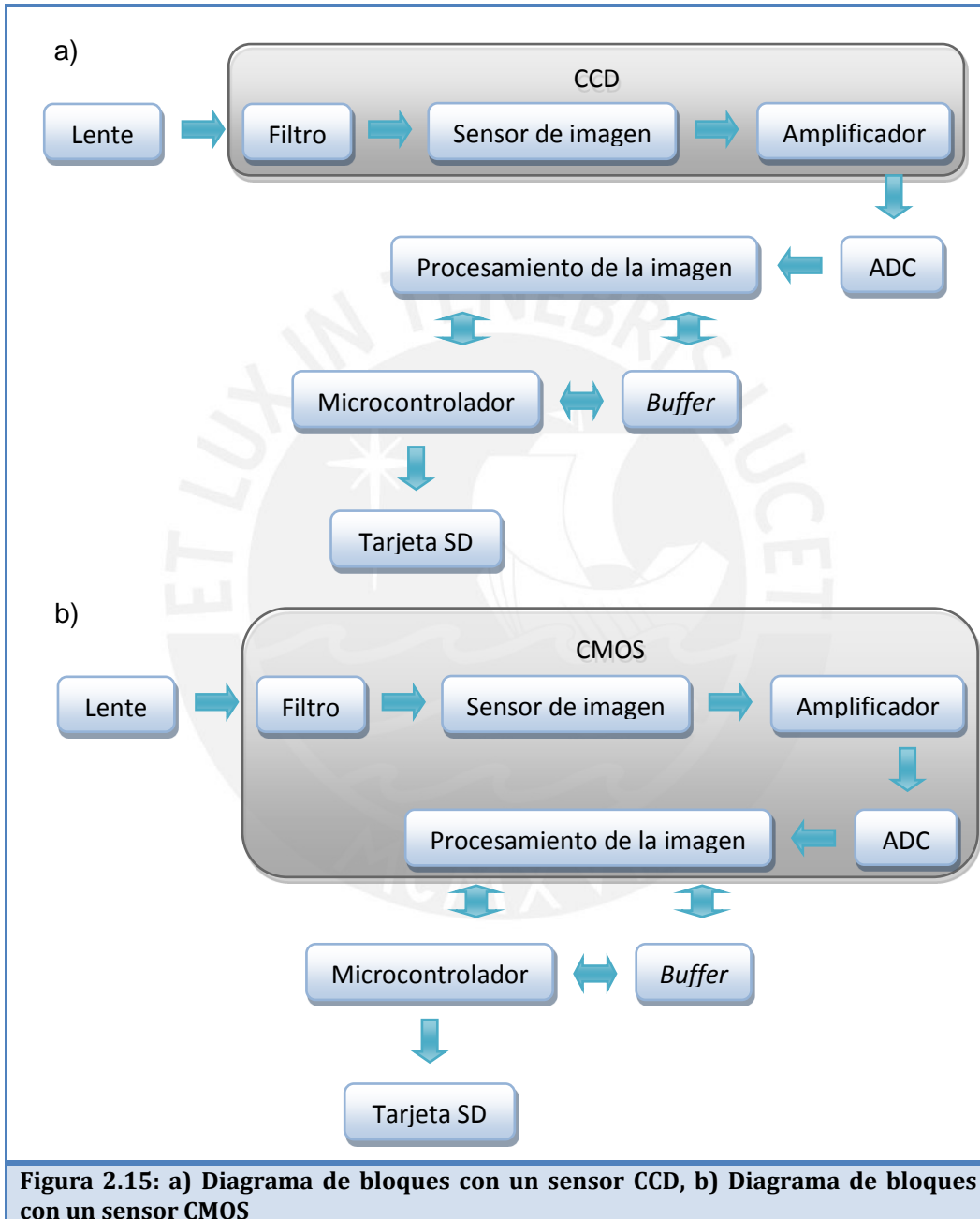


Figura 2.15: a) Diagrama de bloques con un sensor CCD, b) Diagrama de bloques con un sensor CMOS

2.2.2 Estado de la investigación

La tecnología CCD es la que tiene más tiempo en el mercado, por ello se desarrolló rápidamente y logró una mayor relación señal/ruido (SNR), esto implica una mejor calidad y nitidez de la imagen. Esta tecnología se encuentra actualmente mejorando ciertas características como la disminución del consumo de energía, utilización de menos fuentes de tensión e integración de la electrónica extra para un manejo más sencillo. Sin embargo hace más de una década la tecnología CMOS interesó por su bajo consumo de energía; es por ello que esta tecnología en los últimos años ha evolucionado más rápido y ha mejorado su calidad de imagen llegando a emplearse en cámaras digitales, logrando un nivel de aceptación comparable a la tecnología CCD y también en los teléfonos celulares por sus características de bajo consumo, utilización de una sola fuente de tensión y la reducción de tamaño debido a la integración de sus partes [7]. En la *figura 2.16* se muestra la evolución de las funciones de las cámaras CCD y CMOS de la empresa SHARP.

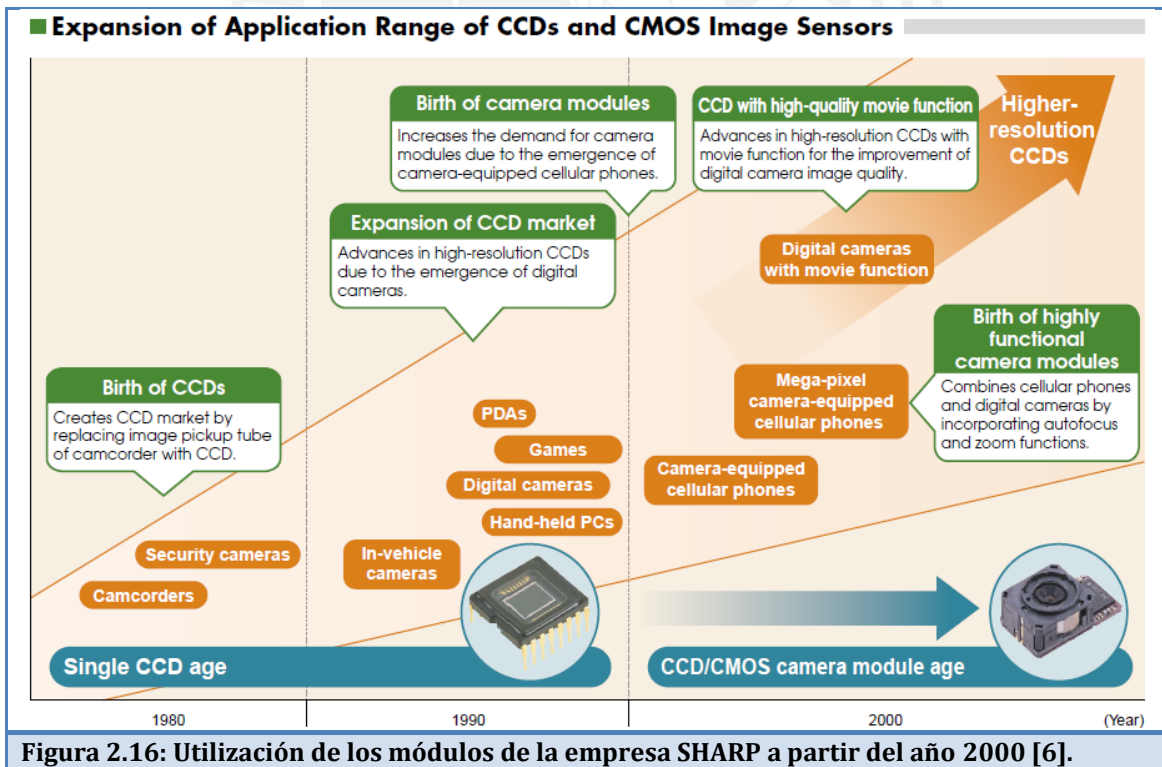


Figura 2.16: Utilización de los módulos de la empresa SHARP a partir del año 2000 [6].

El uso de sensores con tecnología CCD es común en grandes satélites de observación terrestre como por ejemplo el satélite avanzado de observación terrestre ALOS en sus módulos PRISM y

AVNIR-2 elaborado por JAXA y lanzado el 24 de Enero del 2006 con una masa de 4000Kg; CARTOSAT-1 o IRS-P5 en sus cámaras pancromáticas cuenta con siete sensores CCD, fue elaborado por ISRO y lanzado el 5 de Mayo del 2005 con una masa de 1560Kg; el CBERS-2 cuenta con catorce sensores CCD de alta resolución (HRCCD), elaborado en conjunto por China y Brasil y fue lanzado el 21 de Octubre del 2003 con una masa de 1450Kg, entre otros. Por otro lado el sistema de adquisición de imágenes a desarrollar debe ser implementado en un CubeSat y tiene limitaciones de espacio, este tipo de satélite se ha utilizado desde el año 2003. Una de las instituciones con mayor desarrollo en este campo es el Instituto tecnológico de Tokio en Japón, que ha desarrollado y puesto en órbita el pico-satélite Cute I y los nano-satélites Cute 1.7+APD I y Cute 1.7+APD II. Los dos últimos incluyeron el mismo sensor CMOS de escaneo progresivo, para uso de celular, con un ángulo de visión de 58° y una profundidad de campo de 120 cm [8] como se muestra en las *figuras 2.17 y 2.18*.

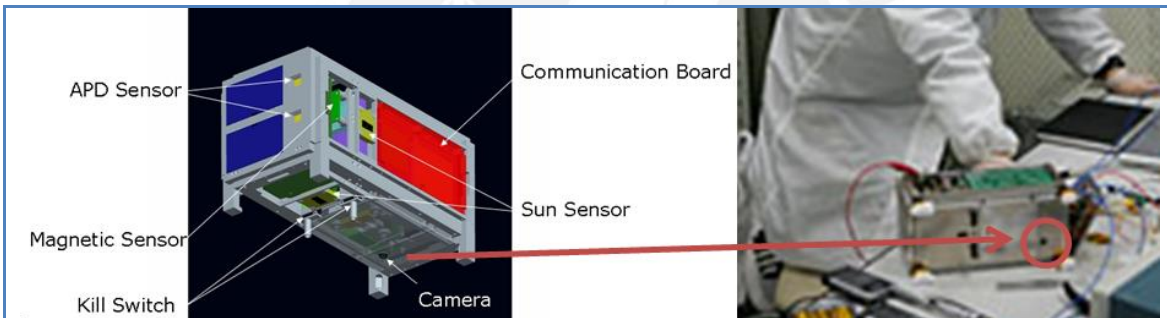


Figura 2.17: Cute 1.7 + APD I

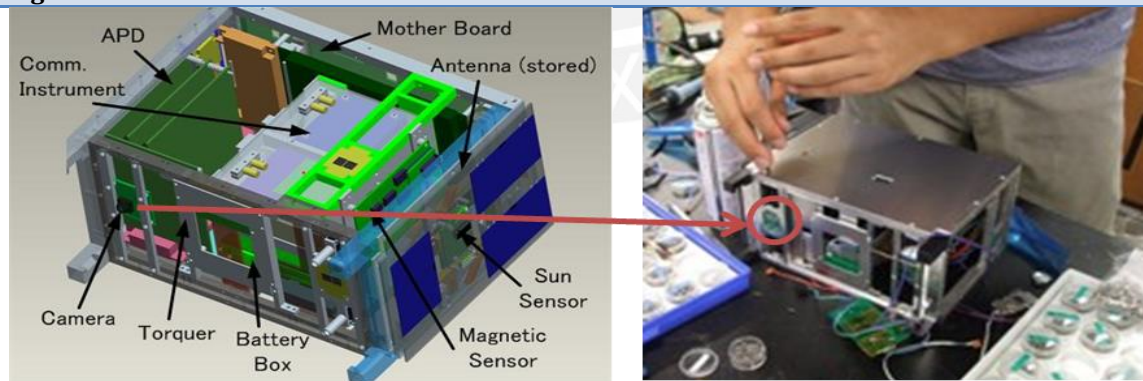


Figura 2.18: Cute 1.7 + APD II

La tecnología CMOS es más utilizada en pico-satélites, también ha sido utilizado en la Universidad de Aalborg de Dinamarca en su CubeSat AAU [9], la Universidad de Tokio de Japón en sus CubeSat XI-IV y XI-V [10], la Corporación Aeroespacial de Estados Unidos en su CubeSat AeroCube-2, la Universidad de Toronto de Canadá en su CubeSat CanX-1 [11], la

Universidad de Drexel de EEUU en su CubeSat DRAGONSAT con el módulo uCAM-RS232 con un sensor de la marca OMNIVISION [12], la Universidad de Ciencias Aplicadas de Aachen de Alemania en su CubeSat COMPASS-1 [13], la Escuela Politécnica Federal de Luassane en su CubeSat SWISSCUBE con un sensor de la marca MICRON [14], la Universidad Técnica de Estambul de Turquía con su CubeSat ITUpSAT [15], la Universidad de Soka de Japón en su CubeSat NEGAI que utilizó el módulo C3188A con un sensor también de OMNIVISION [16], entre otras con la misión de tomar imágenes de la Tierra.

2.2.3 Síntesis sobre el asunto de estudio

Como se pudo observar los sensores con tecnología CCD están siendo utilizados en satélites grandes de observación terrestre debido a que esta tecnología presenta mayor tiempo en el mercado y por tal motivo está más desarrollado, las aplicaciones para estos satélites son de cartografía, monitoreo de desastres, inspección de recursos naturales, por ello se necesita de una gran resolución como por ejemplo el ALOS que tiene una resolución de 2.5m en el sensor pancromático, el sistema de adquisición de imágenes para este tipo de aplicaciones consume mucha energía, es de grandes dimensiones, más complejo, más costoso, y requiere más tiempo de desarrollo. Lo que se busca en el satélite PUCP-SAT-1 es tomar fotos de la Tierra con un sistema que no consuma mucha energía, que no ocupe un volumen mayor a $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$, con una óptica sencilla y que todo el sistema no sea costoso ni conlleve años de desarrollo, y como se pudo observar la tecnología CMOS es la más utilizada en los CubeSat's, por tal motivo la tecnología que se utilizará para el desarrollo del sistema de adquisición de imágenes en el satélite PUCP-SAT-1 será un sensor de tecnología CMOS.

2.3 Modelo teórico

El sistema de adquisición de imágenes está conformado por una parte óptica, el sensor de imágenes, un microcontrolador, una memoria RAM y una memoria Flash.

Primero se debe elegir el sensor, para ello se debe investigar sobre los distintos dispositivos que utilizan un sensor de imágenes como las cámaras, las clases de cámaras que hay en el mercado, las características de estos dispositivos, analizar su posible uso en el espacio considerando el rango de temperaturas al cual estará sometido, sus dimensiones, la necesidad

de electrónica extra para su funcionamiento, que ventajas y desventajas presentan para el sistema que se quiere implementar. Para la parte óptica lo más recomendable sería utilizar un dispositivo que incluya un set de lentes intercambiables, por facilidad, debido a que la elaboración de la lente depende netamente de las dimensiones del sensor de imagen, de la distancia focal, del ángulo de visión que se necesita, entre otros, por ello el contar con un set de lentes intercambiables permitirá mayor flexibilidad, ya que al tener distintas opciones de ángulo de visión como las lentes teleobjetivo y gran angular (*“fish-eye”*) permitirá apuntar y capturar un objetivo específico o un objetivo con una visión de campo mucho más abierta.

El microcontrolador se encarga de todo el manejo del sistema, para asegurar su funcionamiento se debe elegir uno que ya haya sido probado en el espacio, es decir que soporte el rango de temperaturas presentes y la radiación; para reducir los efectos causados por la radiación se debe utilizar una protección extra como una placa de aluminio; respecto a la comunicación con las demás partes del sistema como el sensor, la memoria RAM y Flash, se debe considerar la compatibilidad en el rango de niveles lógicos y protocolos de comunicación que maneja para asegurar el intercambio de información con todo el sistema, entre sus características debe tener un consumo bajo de energía y un empaque que no sea complicado de soldar.

Las imágenes capturadas deben ser almacenadas previamente en una memoria RAM; se debe analizar si la memoria a utilizar será una SRAM o FIFO y considerar el máximo tamaño de una imagen sin comprimir, ya que ese es el peso que se debe almacenar por imagen, este dato se calcula con la resolución del sensor y el número de Bytes de información de un píxel; es muy importante considerar el efecto que causan los rayos cósmicos a los transistores de la memoria, por ejemplo si se utiliza una memoria de mayor capacidad esto implica que los transistores internos sean más pequeños, lo que genera la posibilidad de que se deterioren por los rayos cósmicos, sin embargo si la memoria es de menor capacidad implica que los transistores sean más grandes y sean más resistentes a los rayos cósmicos pero esto depende de la tecnología que se haya usado para elaborar la memoria, se puede relacionar el año de fabricación del componente respecto a la tecnología utilizada, mientras más antiguo sea el integrado mayor posibilidad de que resista los rayos cósmicos, aparte se debe utilizar una protección extra como una placa de aluminio como en el caso del microcontrolador.

Al final las imágenes deben quedar almacenadas en una memoria Flash, se debe analizar la más conveniente, utilizar un integrado o una tarjeta de memoria; para decidir su capacidad se debe calcular el mayor espacio de memoria que ocuparía una foto y la cantidad de fotos que se

desean almacenar; también se debe considerar el efecto del cambio de temperatura y de los rayos cósmicos a la memoria flash como se hizo con las demás partes del sistema y tomar en cuenta el análisis del tamaño de los transistores como se hizo con la memoria RAM.

2.4 Inconvenientes del sistema en órbita

El éxito de la misión predomina en la toma de decisiones. El sistema de adquisición de imágenes deberá afrontar las siguientes complicaciones:

- ✓ Satélites como el CubeSat no tienen un largo periodo de vida por lo que el ahorro de energía es necesario durante el desarrollo de la misión, el sistema debe ser de muy bajo consumo.
- ✓ El espacio en un CubeSat es reducido, cuenta con un volumen de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, por ello la implementación del sistema de adquisición de imágenes debe ser lo más reducido posible, como máximo un volumen de $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ es decir un octavo del volumen del CubeSat.
- ✓ Debe resistir el ambiente hostil debido a la presencia de los rayos cósmicos y la variación de la temperatura del satélite, un rango considerado entre -40°C a 85°C por encontrarse en una órbita baja (LEO).

CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL SISTEMA

En este capítulo se presenta el objetivo principal de la tesis. Se analizan y comparan distintos sistemas de adquisición de imágenes con la finalidad de elegir aquel que permita diseñar el prototipo final del satélite.

3.1 Objetivos

3.1.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un prototipo de un sistema de adquisición de imágenes, cuyo volumen debe ser menor al de un octavo del volumen de un CubeSat.

3.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Comprender el entorno donde funcionará el sistema.
- ✓ Seleccionar el sensor con la tecnología más adecuada para el sistema.
- ✓ Diseñar el sistema con la cantidad mínima de componentes necesarios para su funcionamiento.
- ✓ Seleccionar la capacidad de la tarjeta de memoria SD más adecuada, para asegurar almacenar una gran cantidad de imágenes y evitar la pérdida de información.
- ✓ Obtener la temperatura del circuito previa captura a cada imagen.
- ✓ Elegir la lente y la distancia más adecuada para obtener imágenes nítidas.

3.2 Análisis de los sistemas de adquisición de imágenes convencionales

Se analizaron cámaras portátiles, cámaras web, cámaras de juguete, cámaras utilizadas en robótica y cámaras de celular.

3.2.1 Cámaras portátiles

Estas cámaras son las más costosas (tienen una gama amplia de precios desde \$100 hasta superar los \$4000) y las de mayor volumen (desde $5.58 \times 9.14 \times 1.77 \text{ cm}^3$), la resolución es ajustable y variable dependiendo del modelo y de la marca, cuentan con botones de control, pantalla LCD, flash, carcasa con visor, etc; utilizan el protocolo USB para transferencia de archivos o mediante la lectura de una tarjeta de memoria y la mayoría cuenta con un sensor CCD. La electrónica está diseñada para funcionar a una temperatura ambiente promedio de 25°C con una presión de 1atm y tienen un tamaño definido que no se puede reducir. La información técnica de estas cámaras es reservada por lo que, el análisis de su funcionamiento en el ambiente requerido sería netamente empírico. Se analizaron dos cámaras portátiles: una HP M305 y una Sony DSC S650 mostradas en la *figuras 3.1 y 3.2* respectivamente.



Figura 3.1: HP M305

Figura 3.2: SONY Cyber-shot DSC-S650

3.2.2 Cámaras web

Estas cámaras son medianas (promedio de $2.7 \times 2.7 \times 6 \text{ cm}^3$) y de mediano costo (desde \$30 hasta \$100 aproximadamente) resolución desde CIF hasta 3.2 MP promedio, utilizan sensores de imagen CMOS y protocolo de comunicación USB para la transferencia de archivos. Esto significa que la electrónica funciona con 5.0V y que el flujo de información va desde 1.5 a 20 Mbits/s, lo que implica trabajar con una frecuencia de reloj mínima de 20MHz para asegurar su funcionamiento, ya que no se conoce si la electrónica cuenta con un bloque de almacenamiento temporal. Por tal motivo el microcontrolador que comandará la cámara, debe contar con el

protocolo USB debido a que la implementación por software es compleja. No se conocen los comandos para poder operar este tipo de cámaras; por lo general se utilizan *drivers* diseñados para sistemas operativos como Windows, Linux, iOS, etc. los cuales permiten su control. Se analizó una cámara DELUXE V865 mostrada en la *figura 3.3*.



Figura 3.3: DELUXE V865

3.2.3 Cámaras de juguete

Las cámaras de juguete son medianas ($5.7 \times 4 \times 1.3 \text{ cm}^3$) y de bajo costo (promedio de \$16) capturan imágenes en formato CIF (352 x 288 píxeles), se alimentan con una pila AAA, tienen una carcasa con visor, pantalla LCD, botones de control y utiliza el protocolo de comunicación USB para la transferencia de archivos. El mayor problema radica en que no hay información técnica sobre la electrónica que utiliza por lo que, el análisis de su funcionamiento en el ambiente requerido sería netamente empírico. Se analizó una cámara BOSTONTEK mostrada en la *figura 3.4*.

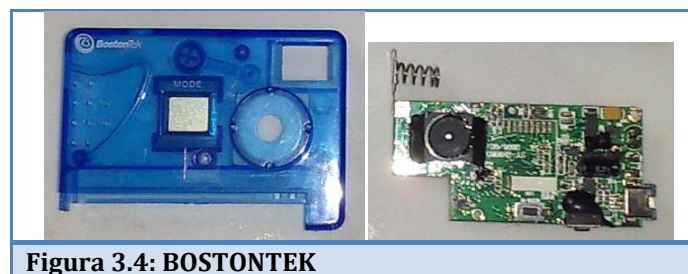


Figura 3.4: BOSTONTEK

3.2.4 Cámaras de robótica

Se les puede considerar de volumen variable y de mediano costo (entre \$30 a \$55). A diferencia de las demás cámaras, estas no cuentan con un estándar establecido en cuanto a protocolo de comunicación, por lo que podemos encontrar una gran variedad de cámaras en el mercado que se eligen dependiendo del propósito, la mayoría tiene una resolución VGA. Algunas de estas cámaras tienen todas las etapas integradas, desde la etapa de adquisición de imágenes hasta su almacenamiento en una tarjeta de memoria SD como la cámara CMUcam3 mostrada en la *figura 3.5*. También podemos encontrar cámaras que se controlan por líneas de comunicación serial, lo que lo hace ideal para su manejo con un microcontrolador. Se pueden configurar y controlar mediante comandos predefinidos como el módulo C328-7640 mostrado en la *figura 3.6*. Lo bueno de estas cámaras es que han sido elaboradas con componentes que fácilmente se encuentran en el mercado, por lo que la información técnica está abierta para el público en general, esto permite analizar la electrónica y verificar detalles importantes como el rango de temperatura de operación, consumo de energía, compatibilidad de niveles lógicos, tamaño de los píxeles, resolución, etc. El módulo C328 utiliza el sensor OV7640 de la empresa OMNIVISION, su rango de temperatura de operación es de -10°C a 70°C , consume 198mW, se alimenta con 3.3V, captura imágenes con resolución VGA (640 x 480 píxeles), las comprime en formato JPEG, se puede controlar mediante una interfaz UART con una velocidad de hasta 115200 bps, tiene un filtro infrarrojo y un filtro RGB, lo que indica que captura imágenes a color y su tamaño es de $20 \times 28 \text{ mm}^2$



Figura 3.5: CMUcam3

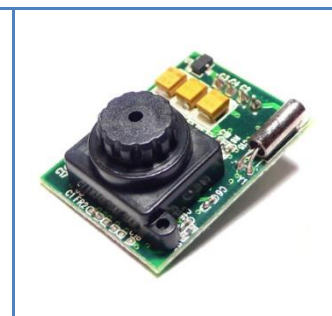
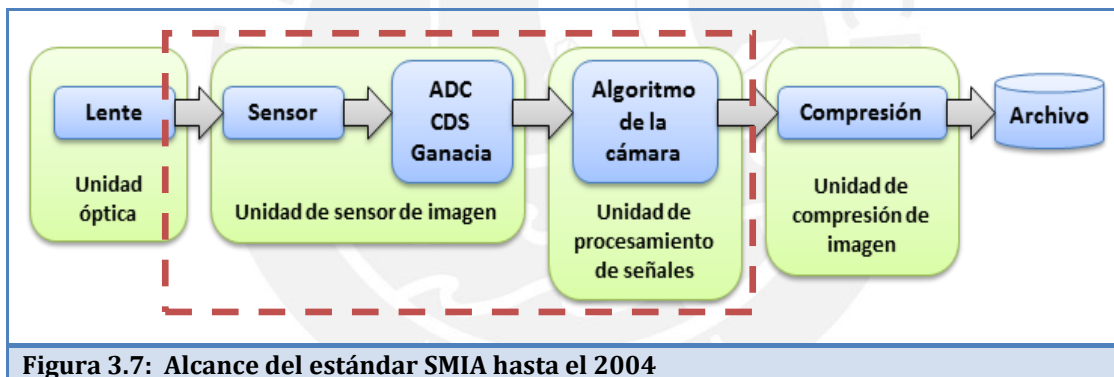


Figura 3.6: C328-7640

3.2.5 Cámaras de celular

Las cámaras de celular son las más pequeñas que se pueden encontrar en el mercado (promedio de $1 \times 1 \times 0.8 \text{ cm}^3$) debido a que utilizan sensores CMOS con una arquitectura SOC y de bajo costo (entre \$9 a \$20). Este tipo de cámaras forman parte de un estándar SMIA (*standard mobile imaging architecture*) mostrado en la *figura 3.7* el cual abarca desde el enfoque de la lente hasta la salida de la imagen en formato RAW. La utilización de este tipo de cámaras sólo necesita la elaboración de las etapas de compresión y almacenamiento para completar el sistema. Este estándar desapareció en agosto del 2009 debido a la complejidad de las cámaras de celular que llegaban hasta 8.0 MP en ese año, sin embargo, hay una gran cantidad de sensores que se pueden encontrar en el mercado de las marcas ST MICROELECTRONICS, NOKIA, TOSHIBA, MAGNACHIP, OMNIVISION que en algunos casos cubren hasta la etapa de compresión de la imagen.





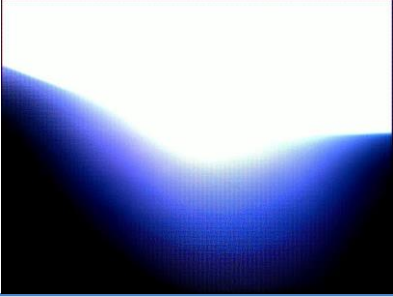
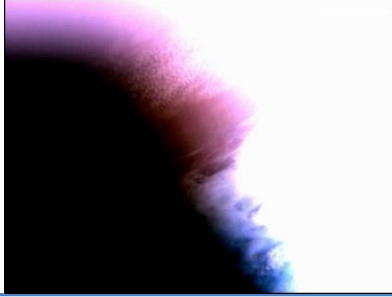
Se analizaron dos cámaras de celular: el sensor VS6624 de la empresa ST MICROELECTRONICS y el sensor HV7131GP de la empresa MAGNACHIP mostrados en las *figuras 3.8* y *3.9* respectivamente. Ambos son muy parecidos, manejan el mismo estándar de comunicación para la configuración del sensor mediante protocolo de comunicación I²C y para la transmisión de la imagen utilizan la comunicación en paralelo de 8 bits. En el caso del sensor de MAGNACHIP el rango de temperatura de operación es de -30°C a 70°C, consume 86mW, se alimenta con 2.8V, tiene una resolución máxima 652x488 píxeles, la transmisión de la imagen se puede dar hasta a 25MHz, tienen un filtro infrarrojo, un filtro Bayer-RGB y su tamaño es de 7.9 x 7.9 mm². Otros sensores como el TCM8240MD de TOSHIBA mostrado en la *figura 3.11* ya tienen implementado la etapa de compresión en formato JPEG.

	
Figura 3.8: ST VS6624	Figura 3.9: MAGNACHIP HV7131GP
	
Figura 3.10: OMNIVISION OVM7690	Figura 3.11: TOSHIBA TCM8240MD

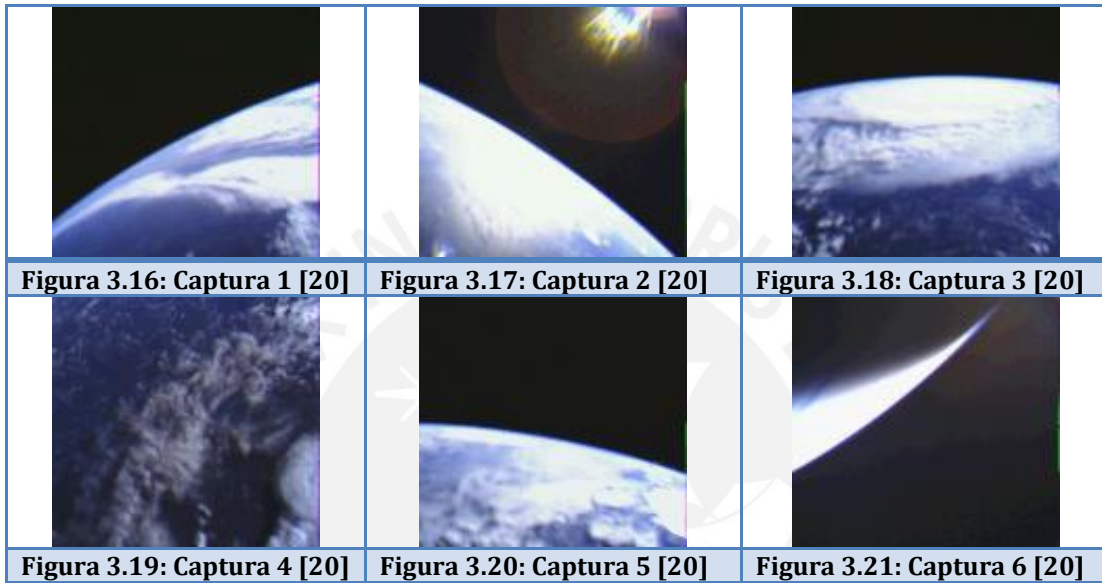
3.3 Cámaras utilizadas en otros satélites

Empresas y universidades de otros países han utilizado cámaras como carga útil en sus satélites, a continuación, se mencionan 8 de estas cámaras utilizadas y se muestran los resultados de las imágenes que algunas de estas pudieron capturar.

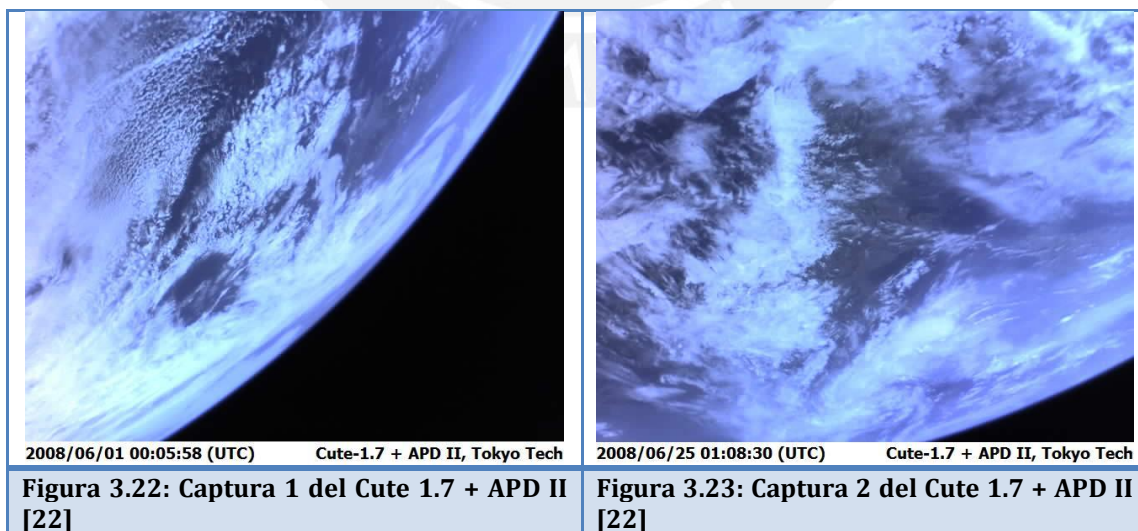
- 1) El sensor OV7648FB de OMNIVISION fue utilizado por la *Universidad de Ciencias Aplicadas de Aachen en Alemania* en su CubeSat COMPASS-1 [13], capturó imágenes en resolución VGA como se observa en las *figuras 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15*.

	
Figura 3.12: Captura 1 del COMPASS-1 [17]	Figura 3.13: Captura 2 del COMPASS-1 [17]
	
Figura 3.14: Captura 3 del COMPASS-1 [17]	Figura 3.15: Captura 4 del COMPASS-1 [17]

2) La cámara C3188A de la empresa QUASAR ELECTRONICS fue utilizado por la *Universidad de Tokio en Japón* en su CubeSat XI-V [18] y [19], capturó gran cantidad de imágenes de resolución QVGA como se observa en las *figuras 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20 y 3.21*. La Universidad de Soka en Japón también utilizó esta cámara en su CubeSat NEGAI.



3) El sensor LZ0P3931 de la empresa SHARP fue utilizado por el Instituto Tecnológico de Tokio de Japón, en su satélite CUTE 1.7 + APDII [21], capturó imágenes en resolución SXGA como se observa en las *figuras 3.22 y 3.23*.



- 4) El sensor IBIS4 de la empresa FILLFACTORY fue utilizado por la Universidad del Sur de Wales en Australia y también lo utilizarán en su micro-satélite BLUEsat [23].
- 5) El sensor KAC1310 de la empresa KODAK fue utilizado por la empresa DEVITECH para diseñar el sistema de adquisición de imágenes del CubeSat AAU de la Universidad de Alborg en Dinamarca [9].
- 6) El sensor HDCS-2020 de la empresa MOTOROLA fue utilizado por el Instituto de Estudios Aeroespaciales de la Universidad de Toronto en su CubeSat CANX-1.
- 7) El sensor ICX429ALL de la empresa SONY fue utilizado por la empresa SRI International para su espectroscopio.
- 8) El sensor MT9V032 de la empresa MICRON fue utilizado por la Escuela Politécnica Federal de Laussane en Suiza en su CubeSat SWISSCUBE.

3.4 Sensores propuestos para el diseño del sistema

Por lo mencionado en la parte 3.2 respecto al tamaño, costo y acceso a la información técnica, las cámaras más adecuadas para el sistema son las de robótica y las de celular. Se analizó la información técnica de los sensores de la parte 3.3 y según dicho análisis se proponen los siguientes dispositivos:

- ✓ Módulo C328-7640
- ✓ Sensor VS6624
- ✓ Sensor HV7131GP

Todas con tecnología CMOS de arquitectura SOC. En la *tabla 3.1* se comparan los tres primeros sensores de la parte 3.3, estos capturaron imágenes y se comparan con los dispositivos propuestos para el diseño del sistema y en la *tabla 3.2* se comparan los cinco últimos sensores de la parte 3.3 que fueron utilizados en el espacio y se comparan con los dispositivos propuestos para el sistema a implementar.

Tabla 3.1

Institución	FACH-Alemania	Universidad de Tokio	LSS-Japón	PUCP Perú	PUCP Perú	PUCP Perú
Proyecto:	COMPASS-1	XI-V	CUTE 1.7 + APDII	PUCP-SAT1	PUCP-SAT1	PUCP-SAT1
Sensor:	OV7648FB	OV7620	LZ0P3931	OV7640	VS6624	HV7131GP
Tecnología	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS
Formato óptico:	1/4"	1/3"	1/3"	1/4"	1/3"	1/4"
Rango de Tramas (fps):	30 @ VGA 60 @ QVGA	30 @ QVGA	15 @ SXGA 30 @ VGA	0.75 @ (160 x 128)	15 @ SXGA 30 @ VGA	30 @ VGA
Área del Píxel (um²):	5.6 x 5.6	7.6 x 7.6	--	5.6 x 5.6	3.0 x 3.0	5.6 x 5.6
Empaque:	20 pin FLEX	Módulo C3188A	28 LCC	Módulo C328R	24 pin ITU	20 pin ITU
Filtro:	RGB Bayer	RGB Bayer	RGB Bayer	RGB Bayer	RGB Bayer	RGB Bayer
Medidas (mm):	10 x 9 x 7.34	40 x 28	10 x 10 x 7.1	20 x 28	8 x 8 x 6.2	22 x 7.1 x 5.9
Alimentación:	2.5v	5v	2.8v	3.3v	2.4 – 3.0 v	2.6 – 3.0 v
Temperatura de operación:	-10° a 70°C	0° a 40°C	-20°C a 60°C	-10° a 70°C	-30° a 70°C	-30° a 70°C
Consumo:	40 mW	120 mW	170 mW	198 mW	186mW	86 mW

3.5 Diseño de los prototipos del sistema de adquisición de imágenes

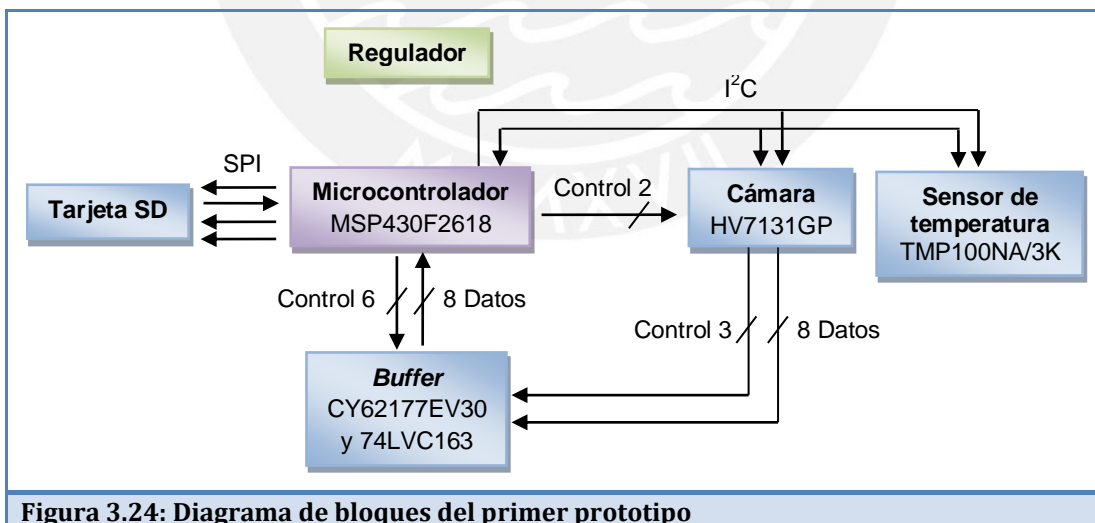
Un dato importante para el diseño del satélite es la necesidad de utilizar un microcontrolador de la familia MSP430 de TEXAS INSTRUMENT debido a que ha sido probado en otros CubeSat's como el CP3, CP4, SWISSCUBE, etc. Esta familia de microcontroladores se ha utilizado en el espacio obteniendo buenos resultados, por ello, se eligió el MSP430F2618 de entre sus similares de la misma familia por tener implementado la interfaz DAC y mayor capacidad de memoria RAM.

Se diseñaron dos prototipos basados en el módulo C328-7640 y el sensor HV7131GP.

En el caso de las cámaras de celular, por el estándar que utilizan, la electrónica que necesita para su funcionamiento es exactamente la misma, por ello las pruebas se realizaron con el sensor HV7131GP por su empaque.

3.5.1 Diseño del primer prototipo con el sensor HV7131GP

El diseño propuesto se muestra el siguiente diagrama de bloques de la *figura 3.24*.



La tarjeta de energía del satélite genera dos tensiones de salida de 5.0V y 3.3V, sin embargo, para este diseño, toda la electrónica a excepción de la tarjeta de memoria SD, que se encuentra en la tarjeta madre del satélite, funcionan con una tensión de 2.8V, esto con el objetivo de que todos los integrados que conforman el sistema utilicen rangos de tensión dentro de los valores

de los niveles lógicos para asegurar su comunicación como se muestra en la *tabla 3.3*. El microcontrolador es el MSP430F2618 y puede funcionar con una frecuencia máxima hasta de 16MHz; el *buffer* cuenta con integrados de tecnología CMOS de la familia LVC debido a que soportan frecuencias de trabajo más elevadas como se observa en la *figura 3.25*.

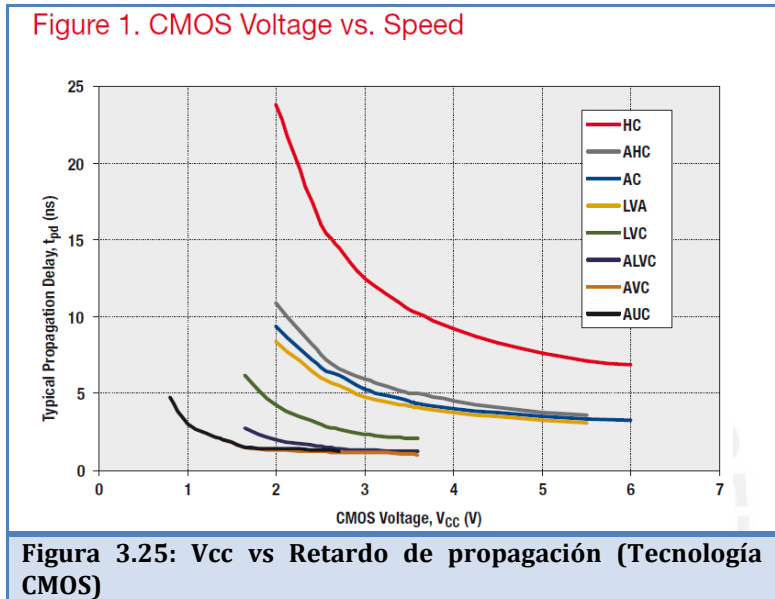


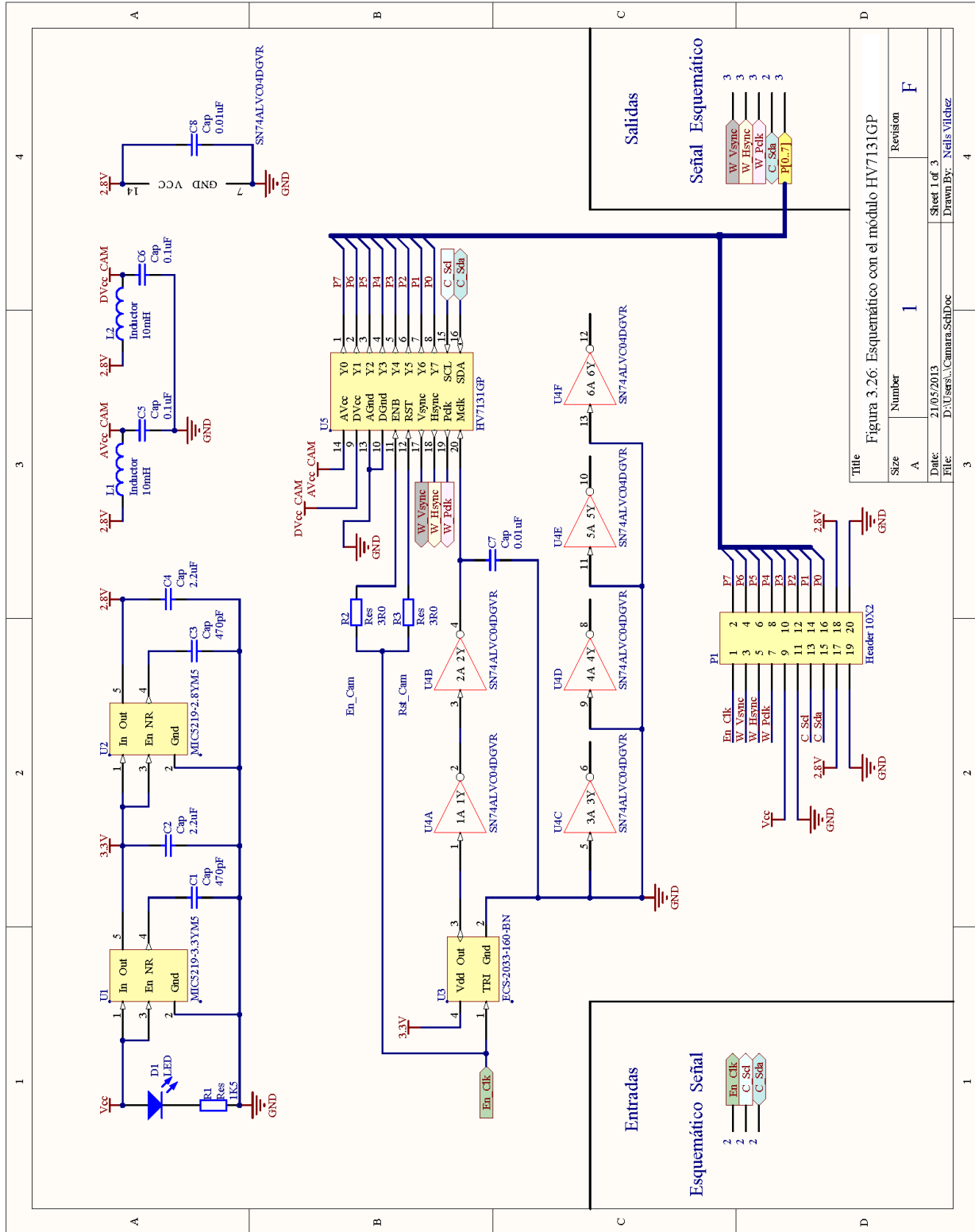
Tabla 3.3: Niveles lógicos de los componentes del primer prototipo

	Tarjeta SD	Microcontrolador MSP430F2618	Cámara HV7131GP	Sensor de temperatura TMP100NA/3K	Buffer	
					CY62177EV30	74LVC163
V _{CC}	3.3V	2.8V	2.8V	2.8V	2.8V	2.8V
V _{IH}	[2.1-3.6]	[2.24-2.8]	[2.0-2.8]	[1.96-2.8]	[2.2-3.1]	[2.0-2.8]
V _{IL}	[0-0.83]	[0-0.6]	[0-0.8]	[0-0.84]	[0-0.7]	[0-0.8]
V _{OH}	[2.48-3.3]	[2.2-2.8]	[2.0-2.8]	[2.0-2.8]	[2.4-2.8]	[2.6-2.8]
V _{OL}	[0-0.42]	[0-0.6]	[0-0.4]	[0-0.4]	[0-0.4]	[0-0.2]

3.5.1.1 Circuito prototipo para el sensor HV7131GP

Toda la electrónica del diseño mostrado en la *figura 3.26* se alimenta con una tensión de 2.8V excepto la tarjeta de memoria SD, que se alimenta con 3.3V, por ello se utilizan dos reguladores **U1** y **U2**, de 3.3V y 2.8V respectivamente. Se pueden utilizar fuentes de tensión de 9.0V o 5.0V en **Vcc** a la entrada de **U1**. Se colocaron filtros de voltaje conformados por los componentes **L1**, **C5** y **L2**, **C6** para alimentar la parte análoga **AVcc_CAM** y la parte digital **DVcc_CAM** del sensor de la cámara. La señal de salida del oscilador de **U3** es de 16MHZ y es controlado por la señal de habilitación **En_Clk**; a la salida del oscilador se colocaron dos inversores **U4A** y **U4B** para generar un retardo entre la habilitación del sensor y el ingreso de la señal de reloj al sensor. La señal **En_Clk** no solo habilita el oscilador sino también controla los modos de funcionamiento del sensor, cuando la señal **En_Cam** está en “0” lógico permanece en el modo *Sleep* y cuando está en “1” lógico permanece en el modo *Normal*, la señal **Rst_Cam** permite reiniciar el sensor al estar en “0” lógico, el retardo permite despertar el módulo antes de que ingrese la señal del reloj. El módulo cuenta con pines de comunicación serial I²C para configurar la cámara mediante las señales **C_Scl** y **C_Sda**, para ello se configura el microcontrolador como maestro y el sensor como esclavo. El sensor genera tres señales para obtener la información de la imagen, las cuales son las siguientes: **W_Vsync**, cada pulso en alta de esta señal indica el inicio de un cuadro; **W_Hsync**, el nivel en alto de esta señal indica que por cada flanco de bajada de la señal cuadrada **W_Pclk** la información que se genera en el puerto **Y[0..7]** del sensor, que forma parte del bus **P[0..7]** del prototipo, es un Byte válido de la imagen; toda la información se almacena en un *buffer* (se muestra en la sección “Circuito prototipo del *buffer* para el sensor HV7131GP”) antes de ser almacenado en la tarjeta de memoria SD que se muestra en la siguiente sección. Se elaboró la tarjeta mostrada en las *figuras 3.27a* y *b* a partir del esquemático de la *figura 3.26* y se observó el pulso de la señal **W_Vsync** mostrado en la *figura 3.28a* y las señales **W_Hsync** y **W_Pclk** que indican la validez de la información del puerto **Y[0..7]** mostradas en la *figura 3.28b* generadas a partir de una señal de reloj **Clk** de 4MHz. Se observa que cada píxel está conformado por tres Bytes generados por el puerto **Y[0..7]**: uno de Luminancia (Y), otro de crominancia en azul (Cb) y otro de crominancia en rojo (Cr) como se puede observar en la *figura 3.29*.

Revisar el plano 1 para una mejor visualización.



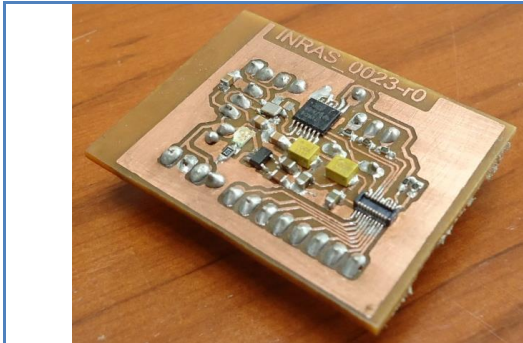


Figura 3.27a: Circuito sin la cámara

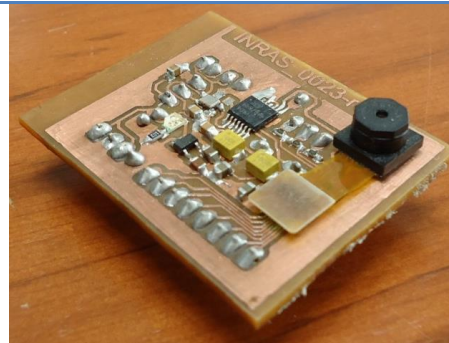
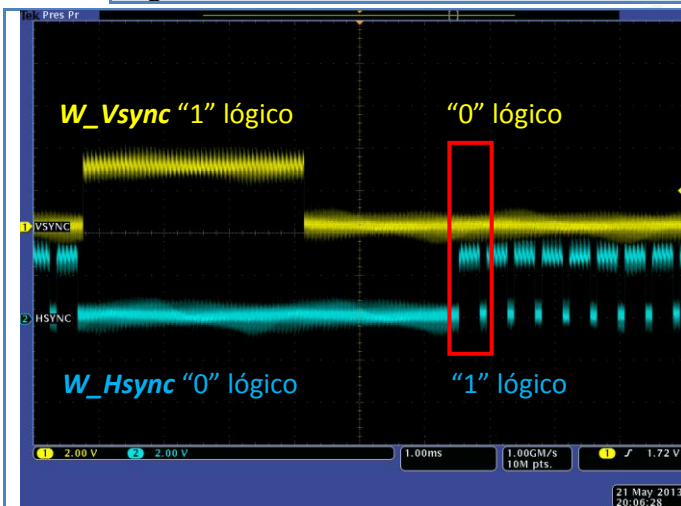


Figura 3.27b: Circuito con la cámara



a: Señales W_Vsync y W_Hsync



b: Señales W_Vsync , W_Hsync y W_Pclk y Clk

Figura 3.28

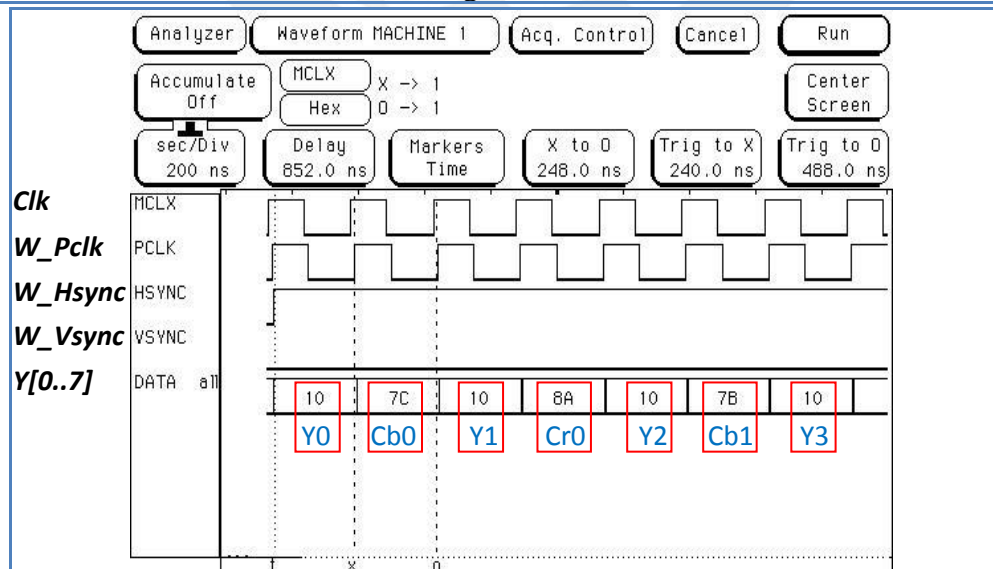
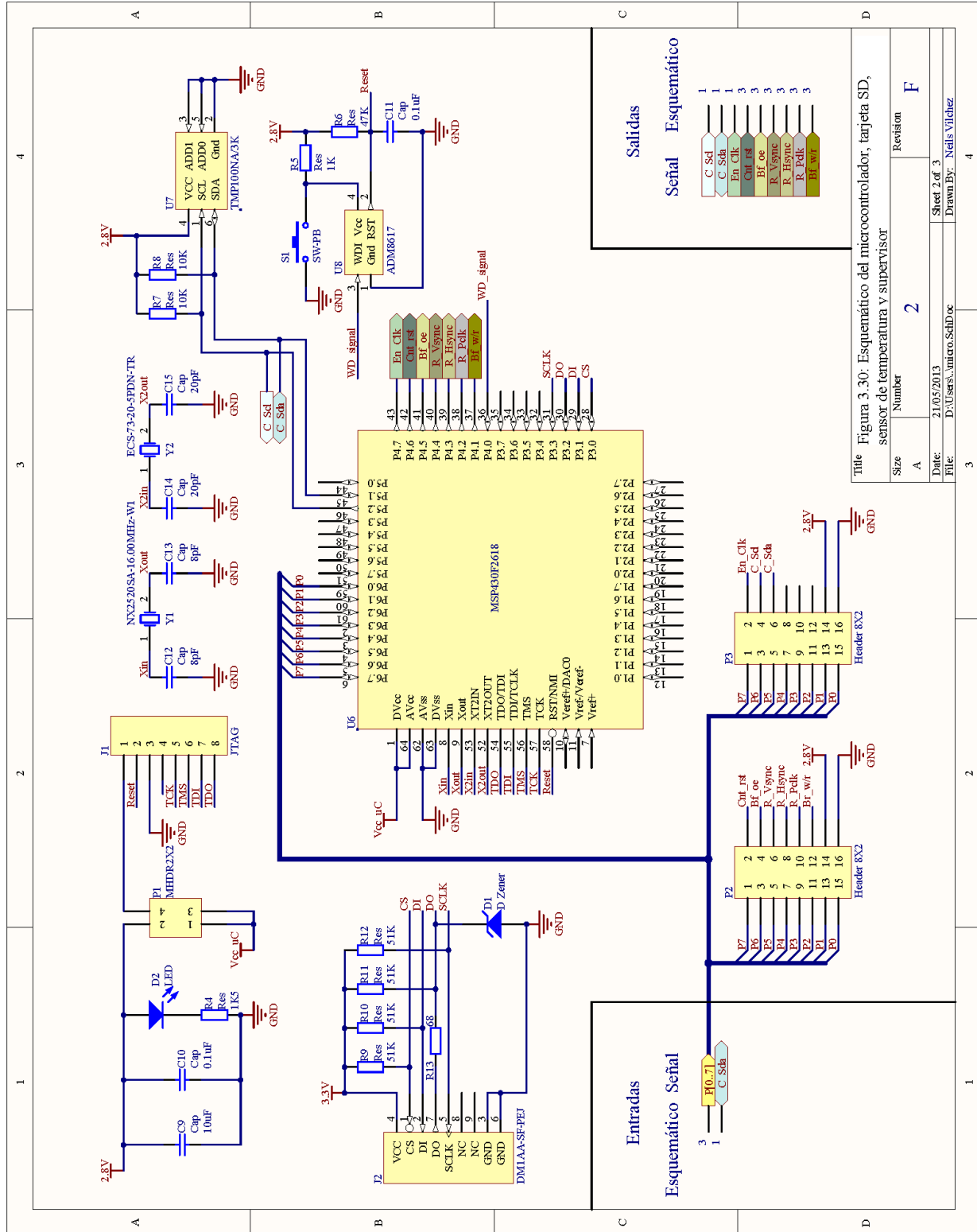


Figura 3.29: Información del analizador lógico al apuntar a un objeto negro.

3.5.1.2 Circuito prototipo del microcontrolador con la tarjeta de memoria SD y sensor de temperatura

En la *figura 3.30* se observa el esquemático del circuito descrito. El microcontrolador MSP430F2618 **U6** se alimenta mediante la tensión **Vcc_uC**, al cortocircuitar 1 y 2 o 3 y 4 de **P1**, que puede ser 2.8V o de 3.3V generado por la interfaz MSPFET430IUF conectada al puerto del JTAG **J1** que utiliza las líneas **TCK**, **TDI**, **TDO**, **TMS** y **Reset** para poder grabar el algoritmo. Se utilizan dos cristales **Y1** e **Y2** de 16MHz y 7.3728MHz con condensadores de **C12**, **C13** y **C14**, **C15** respectivamente para que resuenen. Se utiliza un integrado *watchdog* **U8** que permite reiniciar el microcontrolador mediante hardware al variar la señal de **Reset**, de “1” lógico, por defecto, a “0” lógico al no recibir ninguna conmutación en la señal **WD_signal** en un tiempo no mayor a 1.6s. Para leer el sensor de temperatura se utiliza el protocolo de comunicación serial I²C, para ello se configuran dos pines del puerto 5, **P5.1** y **P5.2** como UCB1SDA y UCB1SCL (líneas **C_Sda** y **C_Scl**) y se conectan dos resistencias pull-up **R7** y **R8**; la dirección del sensor es de 0x48 configurada por los pines **ADD0** y **ADD1**. La comunicación con la tarjeta de memoria SD **J2** se realiza mediante el protocolo de comunicación SPI, para ello se configuran cuatro pines del puerto 3, **P3.0**, **P3.1**, **P3.2** y **P3.3** como UCB0STE, UCB0SIMO, UCB0SOMI y UCB0CLK (líneas **CS**, **DI**, **DO** y **SCLK**). Para asegurar la comunicación entre el microcontrolador y la tarjeta de memoria SD en el pin **P3.2** se coloca una resistencia **R13** y un diodo zener **D1** de 2.6V con la finalidad de que la línea **DO** mantenga un rango de tensión permitido para que el microcontrolador interprete adecuadamente el “1” lógico (a partir de 2.48V); ya que en caso la tarjeta de memoria SD no pueda entregar la corriente necesaria para llegar a 2.6V será suficiente para llegar a 2.8V. El puerto 4 se encarga de generar la señal **WD_signal** mediante **P4.0**, controlar la señal **Bf_w/r** para la lectura o escritura del circuito del *buffer* mediante **P4.1**, generar las señales **R_Vsync**, **R_Hsync** y **R_Pclk** de lectura del *buffer* mediante los pines **P4.2**, **P4.3** y **P4.4**, habilitar la escritura del *buffer* con la señal **Bf_oe** mediante **P4.5**, reiniciar el direccionamiento del *buffer* con la señal **Cnt_rst** mediante **P4.6** y habilitar la señal de reloj de la cámara **En_Clk** mediante **P4.7**. El puerto **P6[0..7]** forma parte del bus **P[0..7]** y se utiliza para leer la información almacenada en el *buffer* y guardarla en **J2**.

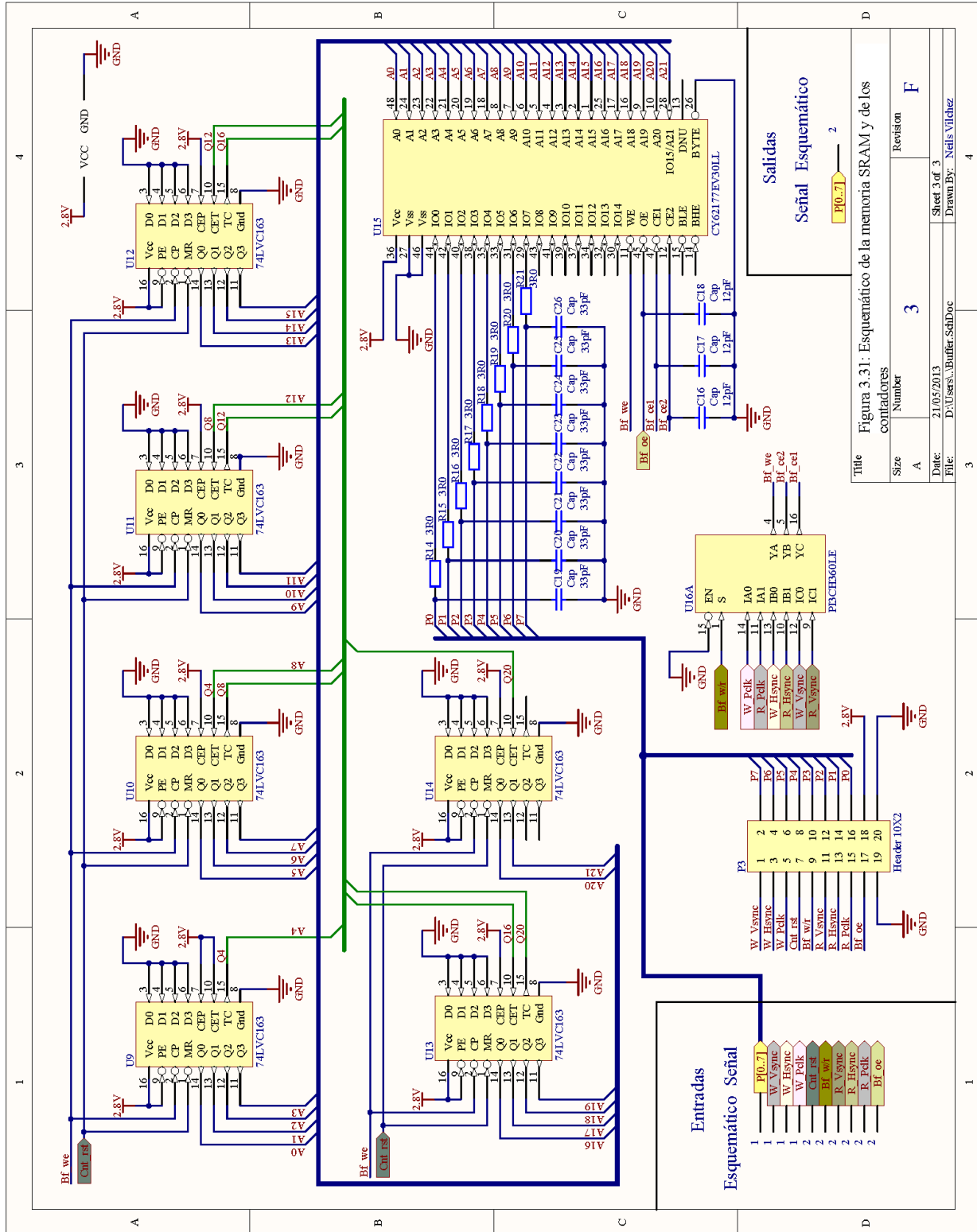
Revisar el plano 2 para una mejor visualización.



3.5.1.3 Circuito prototipo del *buffer* para el sensor HV7131GP

En la *figura 3.31* se observa el esquemático del circuito descrito. El *buffer* está conformado por una memoria SRAM de 4MB **U15** y seis contadores de cuatro bits **U9 al U14** debido a que el arreglo de la memoria es una matriz de ocho bits por registro direccionada por dos decodificadores uno de filas y el otro de columnas de once bits cada uno, es decir veintidós bits en total del **A0 al A21** para direccionar los registros. Para lograr trasladar la información de la cámara al *buffer* el puerto **IO[0..7]** de la memoria SRAM forma parte del bus **P[0..7]** los que cuentan con filtros pasabajos conformados por condensadores y resistencias del **C19-R14** al **C26-R21**. El selector **U16A** permite controlar la escritura o lectura de la memoria con la señal **Bf_w/r**; cuando esta señal presenta un nivel lógico bajo se conectan las líneas de control de la memoria **Bf_ce1**, **Bf_ce2** y **Bf_we** con las señales **W_Vsync**, **W_Hsync** y **W_Pclk** (generadas por los pines Vsync, Hsync y Pclk del sensor de imagen U5 del esquemático del circuito prototipo para el sensor HV7131GP mostrado en la *figura 3.28*), o cuando la señal **Bf_w/r** presenta un nivel lógico alto se conectan las líneas de control de la RAM **Bf_ce1**, **Bf_ce2** y **Bf_we** con las señales **R_Vsync**, **R_Hsync** y **R_Pclk** (generadas por los pines P4.4, P4.3 y P4.2 del microcontrolador U6 del esquemático del circuito prototipo del microcontrolador con la tarjeta de memoria SD y sensor de temperatura mostrado en la *figura 3.31*); para este último caso se necesita habilitar la lectura de la memoria SRAM mediante la señal **Bf_oe**. Una vez terminado la escritura o lectura de la memoria se procede a reiniciar el direccionamiento para ello se cuenta con la señal **Cnt_rst**.

Revisar el plano 3 para una mejor visualización.



Consumo y costos

Los cálculos del consumo de la energía estática (P_S) y dinámica (P_D) de los circuitos de las figuras 3.26, 3.30 y 3.31 se muestran en las tablas 3.4 y 3.5.

$$P_S = V_{CC} \times I_{CC}$$

V_{CC} = Tensión de entrada

I_{CC} = Consumo de corriente

$$P_D = P_T + P_L$$

$$P_T = C_{pd} \times V_{CC}^2 \times f_i \times N_{SW}$$

$$P_L = C_L \times V_{CC}^2 \times f_o \times N_{SW}$$

P_T = Consumo de la energía transitoria

f_i = Frecuencia de la señal de entrada

N_{SW} = Número de bits conmutando

C_{pd} = Capacitancia de disipación de la energía dinámica

P_L = Consumo de la energía de carga capacitiva

f_o = Frecuencia de la señal de salida

C_L = Capacitancia externa

N_{SW} = Número total de salidas conmutando

Tabla 3.4

	V_{CC} (V)	I_{CC} (mA)	C_{pd} (pF)	f_i (MHz)	N_{SW}	C_L (pF)	f_o (MHz)	N_{SW}
Oscilador 16MHz	3.3	7	-	-	-	7	16	1
SN74ALVC04DGVR	2.8	12	27.5	16	1	50	16	1
ADM8617	2.8	0.012	-	-	-	-	-	-
CY62177EV30LL	2.8	45	15	4	12	15	4	8
74LVC163	2.8	20	17	16	2	50	16	4
MSP430F2618	2.8	10	-	-	-	20	4	3
TMP100	2.8	0.07	-	-	-	-	-	-
PI3CH360LE	2.8	0.8	-	-	-	10	16	3

Tabla 3.5

	P_S (mW)	P_T (mW)	P_L (mW)	P_{TO} (mW)	Cantidad	P_{TOTAL} (mW)
Oscilador 16MHz	23.1	-	-	23.1	1	23.1
SN74ALVC04DGVR	33.6	3.45	6.3	43.35	1	43.35
ADM8617	0.037	-	-	0.037	1	0.037
CY62177EV30LL	126	5.6	3.8	135.4	1	135.4
74LVC163	56	4.3	25.1	85.4	6	512.4
MSP430F2618	28	-	1.88	29.88	1	29.88
TMP100	0.196	-	-	0.196	1	0.196
PI3CH360LE	2.24	-	3.76	6	1	6
HV131GP	-	-	-	86	1	86
						836.363

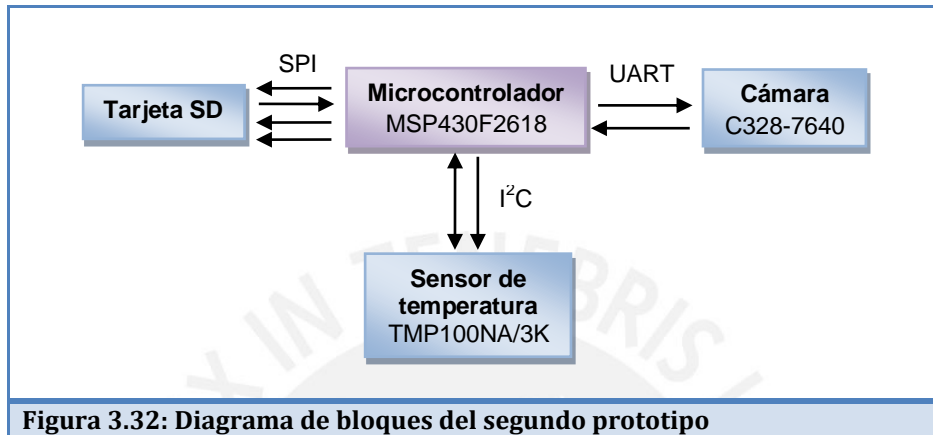
En la *tabla 3.6* se encuentran los componentes del diseño final, aquellos componentes que no se encuentran en la lista solo fueron utilizados para pruebas.

Tabla 3.6

	Descripción	Número de parte Digiky	Número de parte Fabricante	Temperatura	Cant.	Precio/u	Precio \$
1	IC REG LDO 500MA 1% 2.8V SOT23-5	576-2762-1-ND	MIC5219-2.8YM5 TR	-40°C ~ 125°C	1	0.96	0.96
2	CAP 470PF 100V CERAMIC X7R 0805	PCC1983CT-ND	ECI-2VB2A471K	-55°C ~ 125°C	1	0.56	0.56
3	CAP CERAMIC 2.2UF 25V X5R 0805	PCC2320CT-ND	ECI-2FB1E225K	-55°C ~ 85°C	1	0.43	0.43
4	OSC 16.000 MHZ 3.3V SMD	XC1430CT-ND	ECS-2033-160-BN	-40°C ~ 85°C	1	5.94	5.94
5	INDUCTOR 10UH MULTILAYER 0805	587-2608-1-ND	CKS2125100M-T	-40°C ~ 85°C	2	0.38	0.76
6	CAP CER 0.10UF 25V X8R 10% 0603	445-2500-1-ND	CI608X8R1E104K	-55°C ~ 150°C	4	0.116	0.464
7	CAP CER 0.010UF 50V X8R 10% 0603	445-2504-1-ND	CI608X8R1H103K	-55°C ~ 150°C	9	0.116	1.044
8	IC HEX INVERTER 14-TVSOP	296-5105-1-ND	SN74ALVC04DGVR	-40°C ~ 85°C	1	0.5	0.5
9	RES ARRAY 3.0 OHM 8TERM 4RES SMD	MNR143R0CT-ND	MNR14E0ABJ3R0	-55°C ~ 125°C	4	0.02	0.08
10	RES 20K OHM 1/4W 5% 0805 SMD	RHM20KCT-ND	ESR10EZPJ203	-55°C ~ 155°C	2	0.142	0.284
11	CMOS Camera Module - 640x480	-----	SEN-00637	-30°C ~ 70°C	1	19.95	19.95
12	CRYSTAL 16.0MHZ 8PF SMD	644-1093-1-ND	NX2520SA-16.000000MHZ-W1	-40°C ~ 85°C	1	1.99	1.99
13	CRYSTAL 7.3728MHZ 20PF SMD	XC734CT-ND	ECS-73-20-5PDN-TR	-40°C ~ 85°C	1	1.05	1.05
14	IC MCU 16BIT 116K FLASH 64-LQFP	296-22697-1-ND	MSP430F2618TPMR	-40°C ~ 105°C	1	14.61	14.61
15	CAP CERAMIC 8.0PF 50V NPO 0805	311-1097-1-ND	CC0805DRNP09BN8R0	-55°C ~ 125°C	2	0.062	0.124
16	CAP CER 12PF 5% 50V NPO 0805	478-1305-1-ND	08055A120JAT2A	-55°C ~ 125°C	5	0.11	0.55
17	CAP CER 10UF 25V X7R 10% 1206	587-2399-1-ND	TMK316B7106KL-TD	-55°C ~ 125°C	1	0.58	0.58
18	RES 47.0K OHM 1/4W 1% 0805 SMD	RHM47.0KAECT-ND	ESR10EZPF4702	-55°C ~ 155°C	1	0.229	0.229
19	RES 10.0K OHM 1/4W 1% 0805 SMD	RHM10.0KAECT-ND	ESR10EZPF1002	-55°C ~ 155°C	1	0.06	0.06
20	IC SUPERVISOR WATCHDOG LV SC70-4	ADM8617SAYAKSZ-RL7CT-ND	ADM8617SAYAKSZ-RL7	-40°C ~ 85°C	1	1.88	1.88
21	IC 4-BIT SYNC BIN CNTR 16TSSOP	568-2293-1-ND	74LVC163PW,118	-40°C ~ 125°C	6	0.73	4.38
22	IC SRAM 32MBIT 55NS LP 48-TSOP	CY62177EV30LL-55ZXI-ND	CY62177EV30LL-55ZXI	-40°C ~ 85°C	1	36	36
23	CAP CER 33PF 50V 5% COG 0603	490-1415-1-ND	GRM1885C1H330JA01D	-55°C ~ 125°C	8	0.026	0.208
24	IC DIGITAL TEMP SENSOR SOT23-6	296-26833-1-ND	TMP100NA/3K	-55°C ~ 125°C	1	2.63	2.63
25	IC 2:1 MUX/DEMUX 3CH 3ST 16TSSOP	PI3CH360LE-ND	PI3CH360LE	-40°C ~ 85°C	1	0.85	0.85
Precio en EEUU							96.113

3.5.2 Diseño del segundo prototipo con el módulo C328-7640

El diseño propuesto se resume en el siguiente diagrama de bloques de la *figura 3.32*.



La tarjeta de energía del satélite alimenta la tarjeta de memoria SD, el microcontrolador MSP430F2618, el módulo C328-7640 y el sensor de temperatura con una tensión de 3.3V. Ello asegura que los niveles lógicos se encuentren en los niveles de tensión permitidos como se muestra en la *tabla 3.7*.

Tabla 3.7: Niveles lógicos de los componentes del segundo prototipo

	Tarjeta SD	MSP430F2618	C328-7640	TMP100NA/3K
V _{CC}	3.3V	3.3 v	3.3 v	3.3 v
V _{IH}	[2.1-3.6]	[2.64-3.3]	[2.0-3.3]	[2.31-3.3]
V _{IL}	[0-0.83]	[0-0.6]	[0-0.8]	[0-0.99]
V _{OH}	[2.48-3.3]	[2.7-3.3]	[2.4-3.3]	[2.31-3.3]
V _{OL}	[0-0.42]	[0-0.6]	[0-0.4]	[0-0.4]

3.5.2.1 Circuito prototipo para el módulo C328-7640

Para alimentar el circuito que se muestra en la *figura 3.33* se utiliza un regulador de 3.3V **U1**, cuya entrada puede ser una batería de 9.0V o una fuente de 5.0V mediante **P1** o **J2**, y cuya salida se conecta al pin 4 de **P2**, de tal forma que al cortocircuitar los pines 3 y 4 de **P2** se alimenta toda la electrónica del circuito asemejando la tensión que genera la tarjeta de energía del satélite, los condensadores **C3** y **C4** se utilizan para eliminar cualquier rizado en los pines de energía. Al cortocircuitar los pines 1 y 2 de **P2** se conecta la interfaz MSPFET430IUF al puerto del JTAG **J1** utilizando las líneas **TCK**, **TDI**, **TDO**, **TMS** y **Reset** para poder cargar el

algoritmo al microcontrolador. Se utilizan dos cristales **Y1** e **Y2** de 16MHz y 7.3728MHz con condensadores **C5**, **C6** y **C7**, **C8** conectados a las líneas **Xin**, **Xout**, **X2in** y **X2out** respectivamente para que resuenen. Se utiliza un circuito supervisor denominado *watchdog* **U2**, el cual permite reiniciar el microcontrolador mediante hardware al variar la señal de **Reset** que por defecto es “1” lógico al cambiar a “0” lógico por no recibir ninguna conmutación en la señal **WD_signal** en un tiempo no mayor a 1.6s o al presionar el pulsador **S1**. Para obtener los datos del sensor de temperatura **U4** se utiliza el protocolo de comunicación serial I²C, para ello se configuran dos pines del puerto 5, **P5.1** y **P5.2** como UCB1SDA y UCB1SCL (líneas **C_Sda** y **C_Scl**) y se conectan dos resistencias pull-up **R2** y **R3**; la dirección del sensor se configura mediante los pines **ADD0** y **ADD1** que para este caso es 0x49. La comunicación con la tarjeta de memoria SD **J3** se realiza mediante el protocolo de comunicación SPI, para ello se configuran cuatro pines del puerto 3, **P3.0**, **P3.1**, **P3.2** y **P3.3** como UCB0STE, UCB0SIMO, UCB0SOMI y UCB0CLK (líneas **CS**, **DI**, **DO** y **SCLK**) y se conectan a las resistencias pull-up **R6**, **R7**, **R8** y **R9** respectivamente, la resistencia **R10** se utiliza como protección de la línea **DO** para evitar cualquier cortocircuito por ser una señal de salida de **J3**.

Revisar el plano 4 para una mejor visualización.

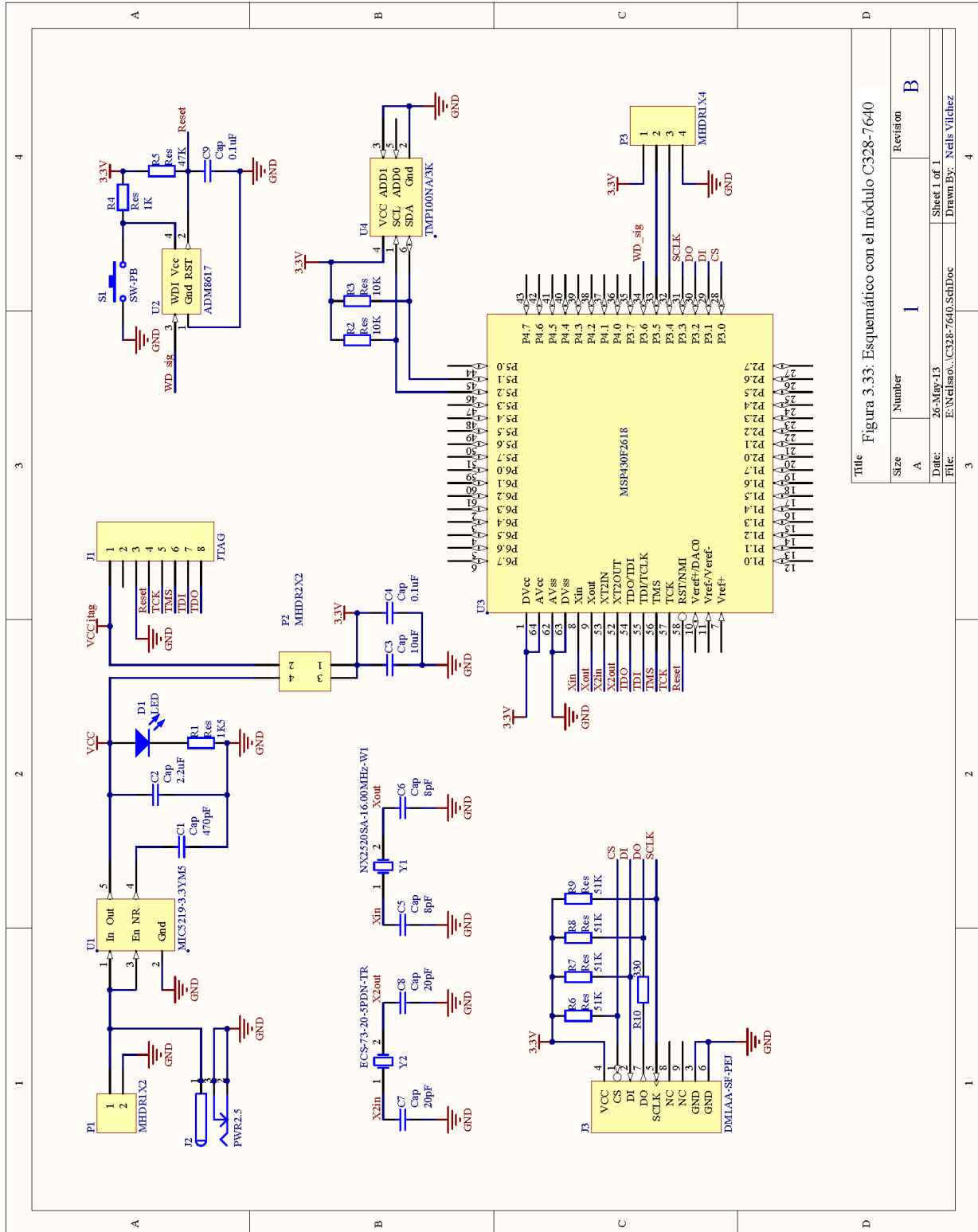


Figura 3.33: Esquemático con el módulo C328-7640

A continuación se muestran en las *figuras 3.34a, b, c y d* el circuito elaborado:

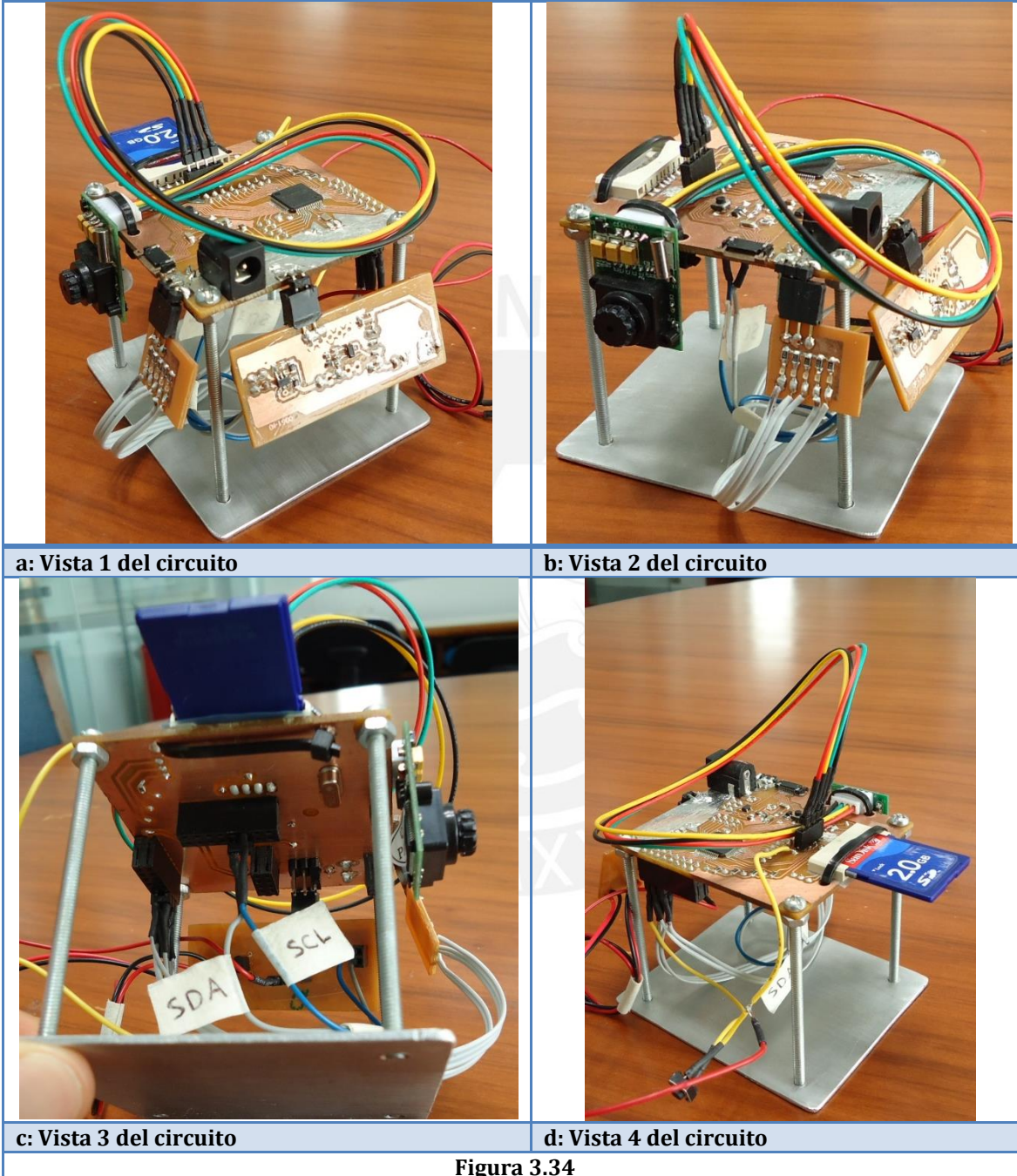


Figura 3.34

Consumo y costos

Los cálculos del consumo de la energía estática (P_S) y dinámica (P_D) de los componentes de la *figura 3.34* se muestran en las *tablas 3.8* y *3.9*.

Tabla 3.8

	V_{CC} (V)	I_{CC} (mA)	C_{pd} (pF)	f_i (MHz)	N_{sw}	C_L (pF)	f_o (MHz)	N_{sw}
Oscilador 16MHz	3.3	7	-	-	-	7	16	1
ADM8617	3.3	0.012	-	-	-	-	-	-
MSP430F2618	3.3	10	-	-	-	20	0.4	3
TMP100	3.3	0.07	-	-	-	-	-	-
Memoria SD	3.3	80						

Nota: La memoria SD utilizada para esta prueba es de DELKIN DEVICES modelo SE51SAXHL-C1000-D de 512MB y su consumo depende de la frecuencia del reloj y de la modalidad de lectura o escritura; con 50MHz el consumo es de 80mA.

Tabla 3.9

	P_S (mW)	P_T (mW)	P_L (mW)	P_T (mW)	Cantidad	P_{TOTAL} (mW)
Oscilador 16MHz	23.1	-	-	23.1	1	23.1
ADM8617	0.0396	-	-	0.0396	1	0.0396
MSP430F2618	33	-	0.261	33.261	1	33.261
TMP100	0.231	-	-	0.231	1	0.231
C328	-	-	-	198	1	198
						254.4
Memoria SD	264					264
						518.4

La corriente y la tensión del circuito mostrado en la *figura 3.34* son de **77mA** y **3.28V** respectivamente cuando no se utiliza la memoria SD y de **85mA** cuando sí se utiliza, lo que genera dos consumos de **252.56mW** y **278.8mW**.

El consumo de energía sin la memoria SD se acerca al consumo obtenido teóricamente de **254.4mW** sin embargo su valor teórico de **518mW** está muy alejado de la realidad cuando se utiliza la memoria, esto se debe a que la frecuencia de reloj real utilizada no es de 50MHz sino de 500KHz como máximo.

En la *tabla 3.10* se encuentran los componentes que irán en el diseño final, aquellos componentes que no se encuentran en la lista solo fueron utilizados para pruebas.

Tabla 3.10

	Descripción	Número de parte Digkey	Número de parte Fabricante	Temperatura	Cant.	Precio/u	Precio \$
1	CAP CER 0.10UF 25V X8R 10% 0603	445-2500-1-ND	C1608X8R1E104K	-55°C ~ 150°C	2	0.116	0.232
2	CAP CERAMIC 8.0PF 50V NP0 0805	311-1097-1-ND	CC0805DRNP09BN8R0	-55°C ~ 125°C	2	0.062	0.124
3	CAP CERAM 27PF 5% 50V NP0 0805	478-1309-1-ND	08055A270JAT2A	-55°C ~ 125°C	2	0.11	0.22
4	CAP CER 10UF 25V X7R 10% 1206	587-2399-1-ND	TMK316B7106KL-TD	-55°C ~ 125°C	1	0.58	0.58
5	CRYSTAL 16.0MHZ 8PF SMD	644-1093-1-ND	NX2520SA-16.000000MHZ-W1	-40°C ~ 85°C	1	1.99	1.99
6	CRYSTAL 7.3728MHZ 20PF SMD	XC734CT-ND	ECS-73-20-5PDN-TR	-40°C ~ 85°C	1	1.05	1.05
7	RES 47.0K OHM 1/4W 1% 0805 SMD	RHM47.0KAECT-ND	ESR10EZPF4702	-55°C ~ 155°C	1	0.229	0.229
8	RES 10K OHM 1/4W 5% 1206 SMD	P10KECT-ND	ERJ-8GEVJ103V	-55°C ~ 155°C	3	0.06	0.18
9	IC SUPERVISOR WATCHDOG LV SC70-4	ADM8617SAYAKSZ-RL7CT-ND	ADM8617SAYAKSZ-RL7	-40°C ~ 85°C	1	1.88	1.88
10	IC MCU 16BIT 116K FLASH 64-LQFP	296-22697-1-ND	MSP430F2618TPMR	-40°C ~ 105°C	1	14.61	14.61
11	IC DIGITAL TEMP SENSOR SOT23-6	296-26833-1-ND	TMP100NA/3K	-55°C ~ 125°C	1	2.63	2.63
12	JPEG Color Camera - UART Interface	-----	SEN-09334	-10°C ~ 70°C	1	54.95	54.95
Precio en EEUU							78.675

3.6 Elección del prototipo más adecuado para el sistema

En los puntos 3.5.1 y 3.5.2 se describen los circuitos prototipos con el sensor HV7131GP y el módulo C328-7640; el primer prototipo es más complejo de desarrollar, utiliza mayor cantidad de componentes lo que genera un mayor costo, su elaboración presenta mayor dificultad lo que conlleva a que sea de mayor tamaño y consume mayor energía. El punto resaltante para la elección del prototipo es la capacidad de almacenar imágenes con un formato de compresión sin la necesidad de ningún algoritmo extra permitiendo ahorrar tiempo en el almacenamiento de información y recursos del sistema, por ello se elige el segundo prototipo.

3.7 Diseño del software para el prototipo elegido

Se utilizó el compilador CrossWorks for MSP430 de ROWLEY ASSOCIATES y la interfaz MSP-FET430UIF de TEXAS INSTRUMENT.

Características del software:

- ✓ Utilización del dispositivo UART interno del microcontrolador para la comunicación con el módulo C328-7640.
- ✓ Manejo del protocolo SPI para el control de la tarjeta de memoria SD con la librería EFFS_THIN para MSP430 de la empresa HCC EMBEDDED [24].
- ✓ Manejo del protocolo I²C para la comunicación con el sensor de temperatura TMP100.
- ✓ Detección de errores, almacenamiento y toma de decisiones como reinicio automático, captura de imágenes o cambiar al modo de bajo consumo.
- ✓ Imagen a color @ 640x480 en formato JPEG.
- ✓ Un solo disparo para la captura de imágenes.
- ✓ Transmisión de datos en paquetes de 512 Bytes.
- ✓ Velocidad de transmisión en la sincronización de 14400 bps
- ✓ Velocidad de transmisión de la imagen a 115200 bps

La *figura 3.35* muestra el diagrama de flujo general y la *figura 3.36* el diagrama de flujo específico del algoritmo del sistema.

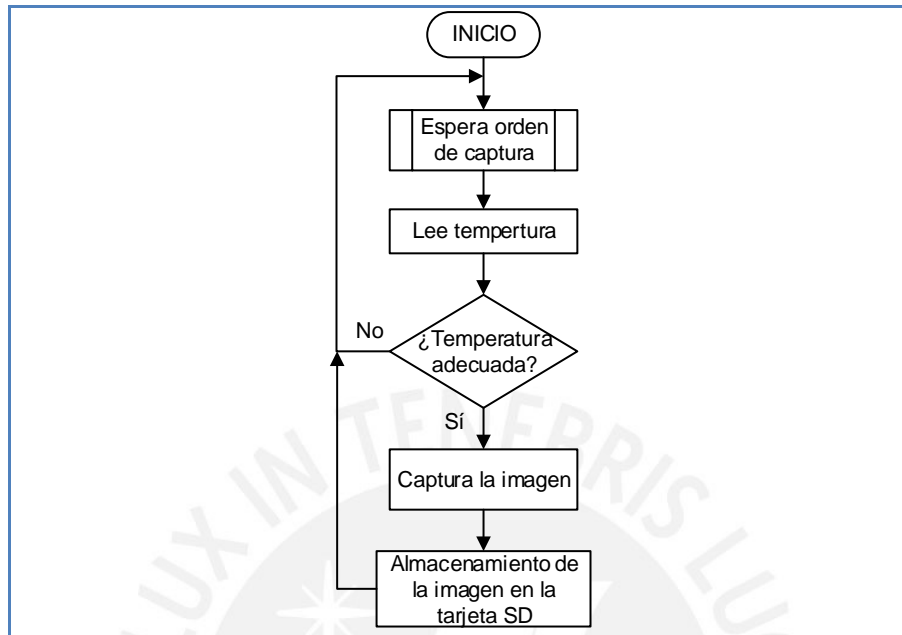


Figura 3.35: Diagrama de flujo general del software

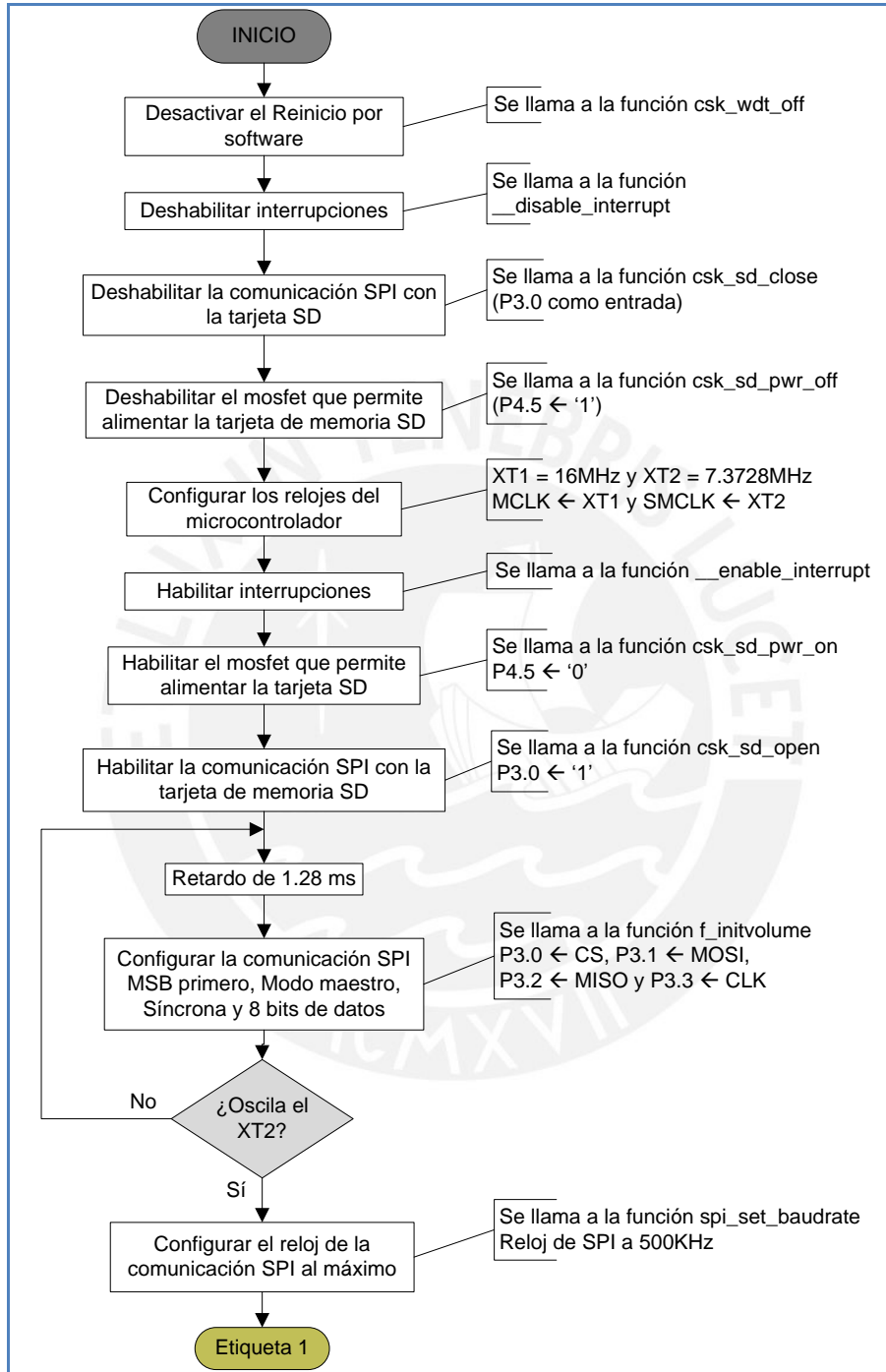
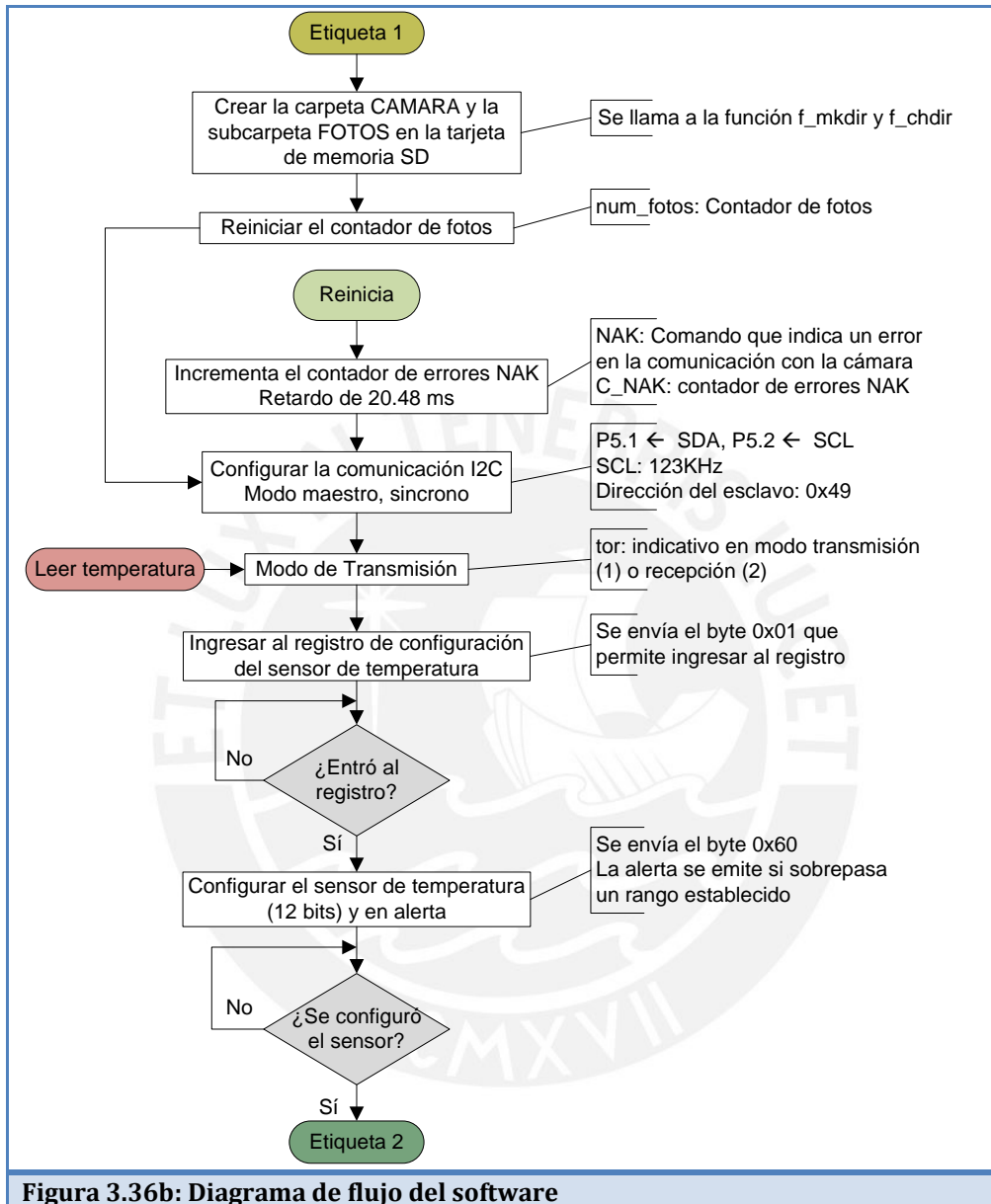


Figura 3.36a: Diagrama de flujo del software



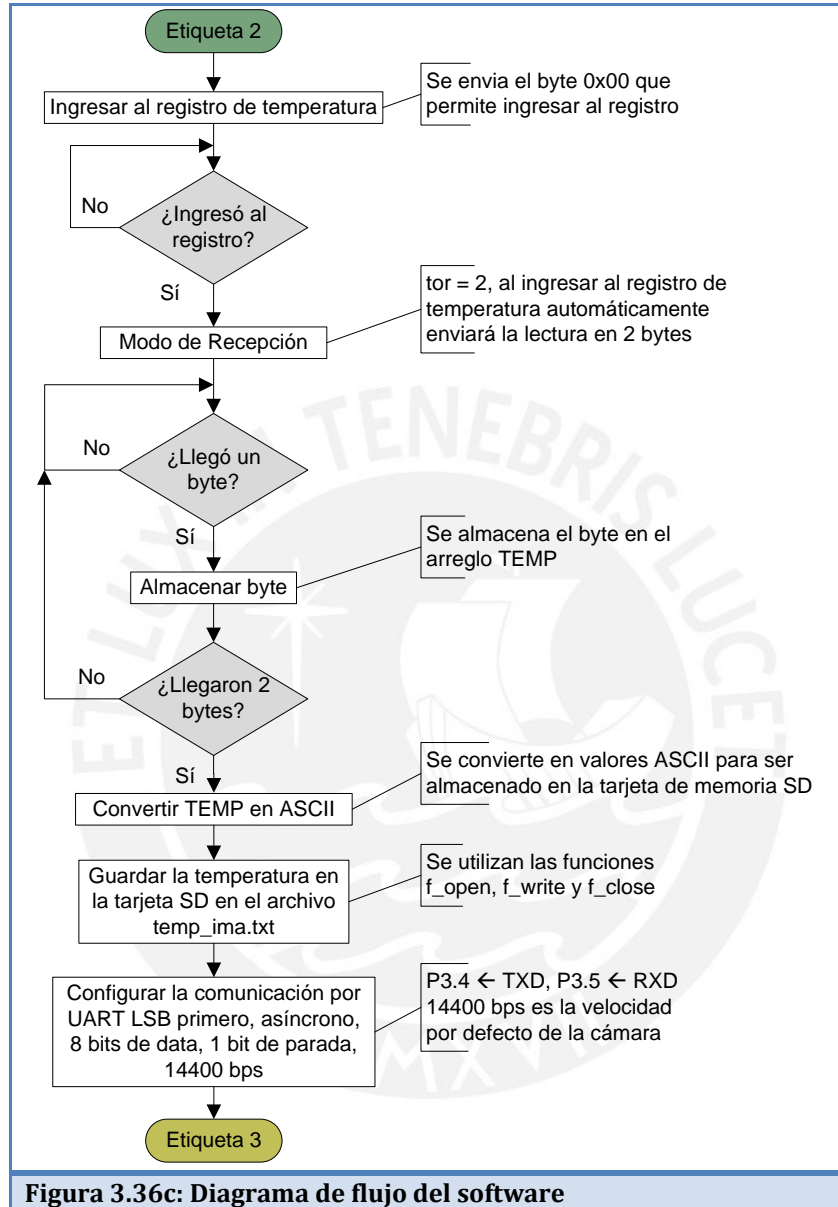


Figura 3.36c: Diagrama de flujo del software

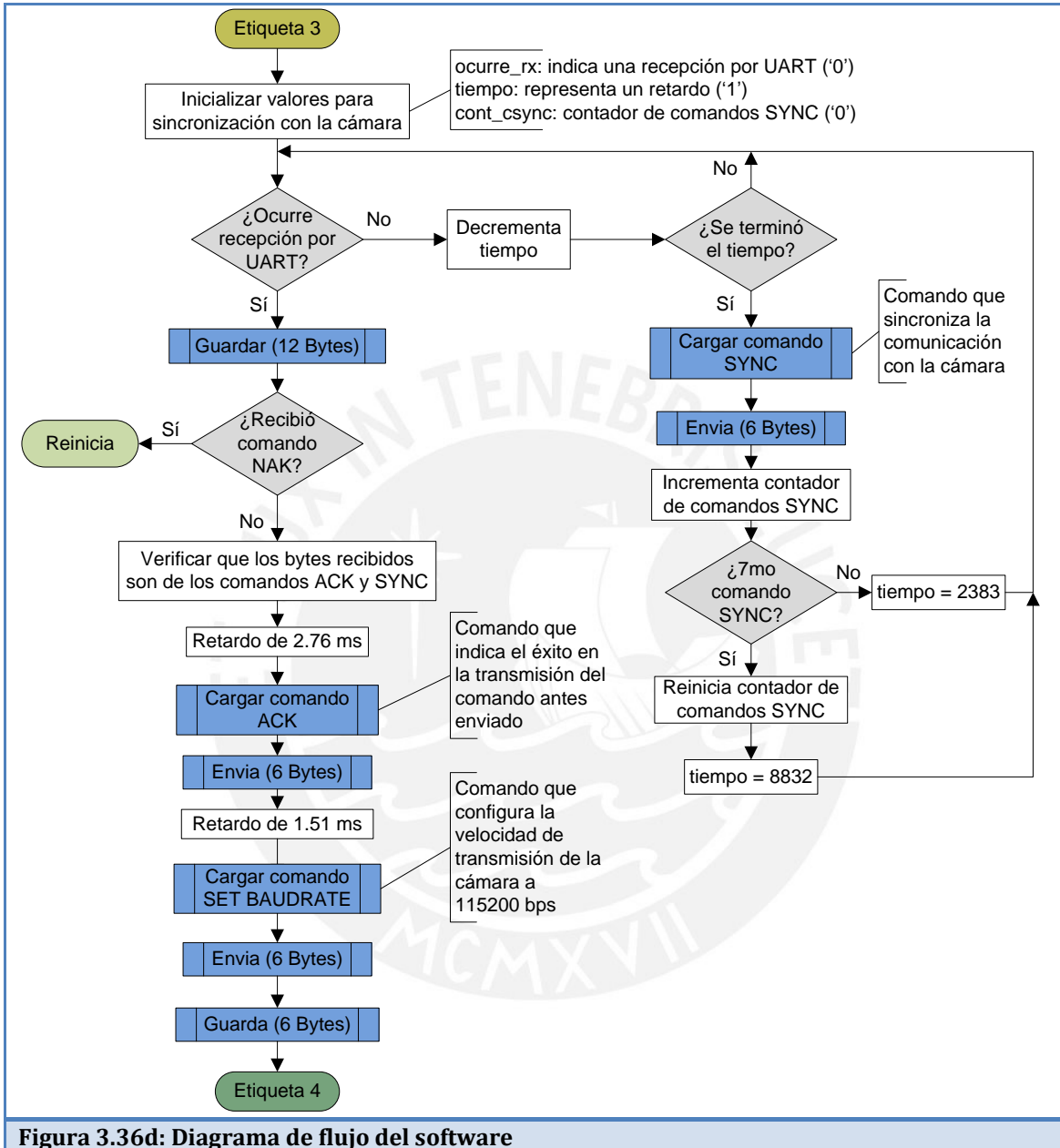


Figura 3.36d: Diagrama de flujo del software

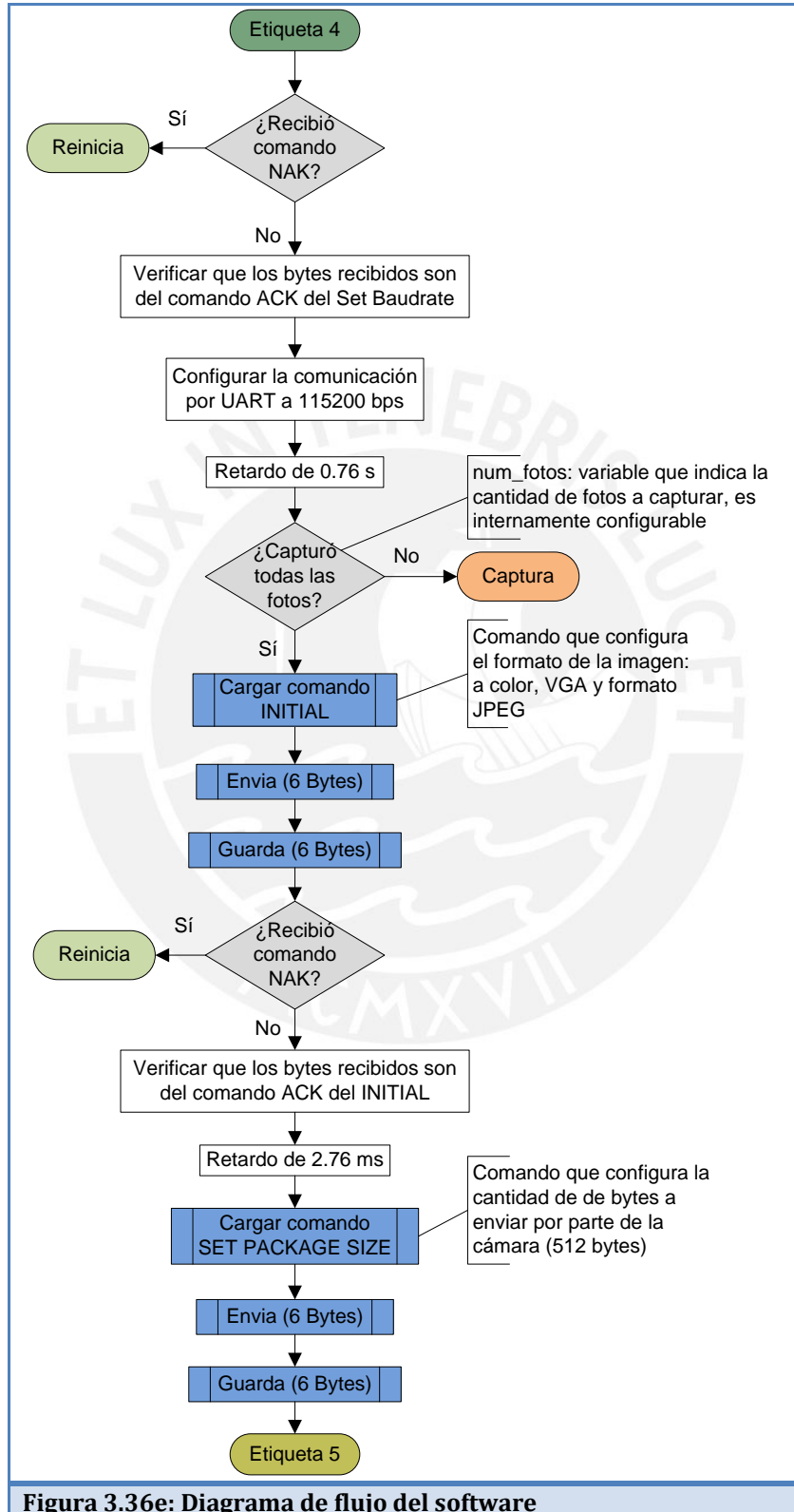
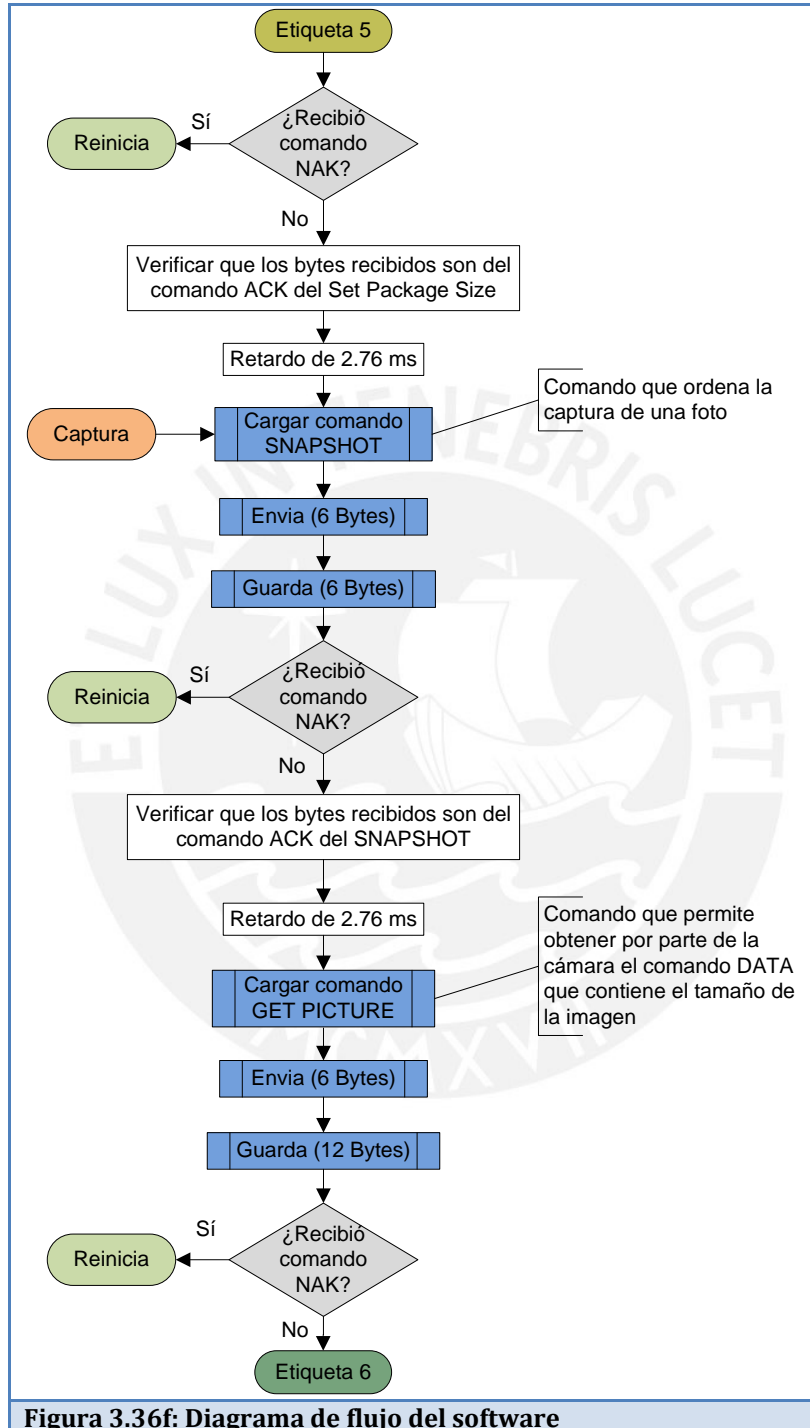


Figura 3.36e: Diagrama de flujo del software



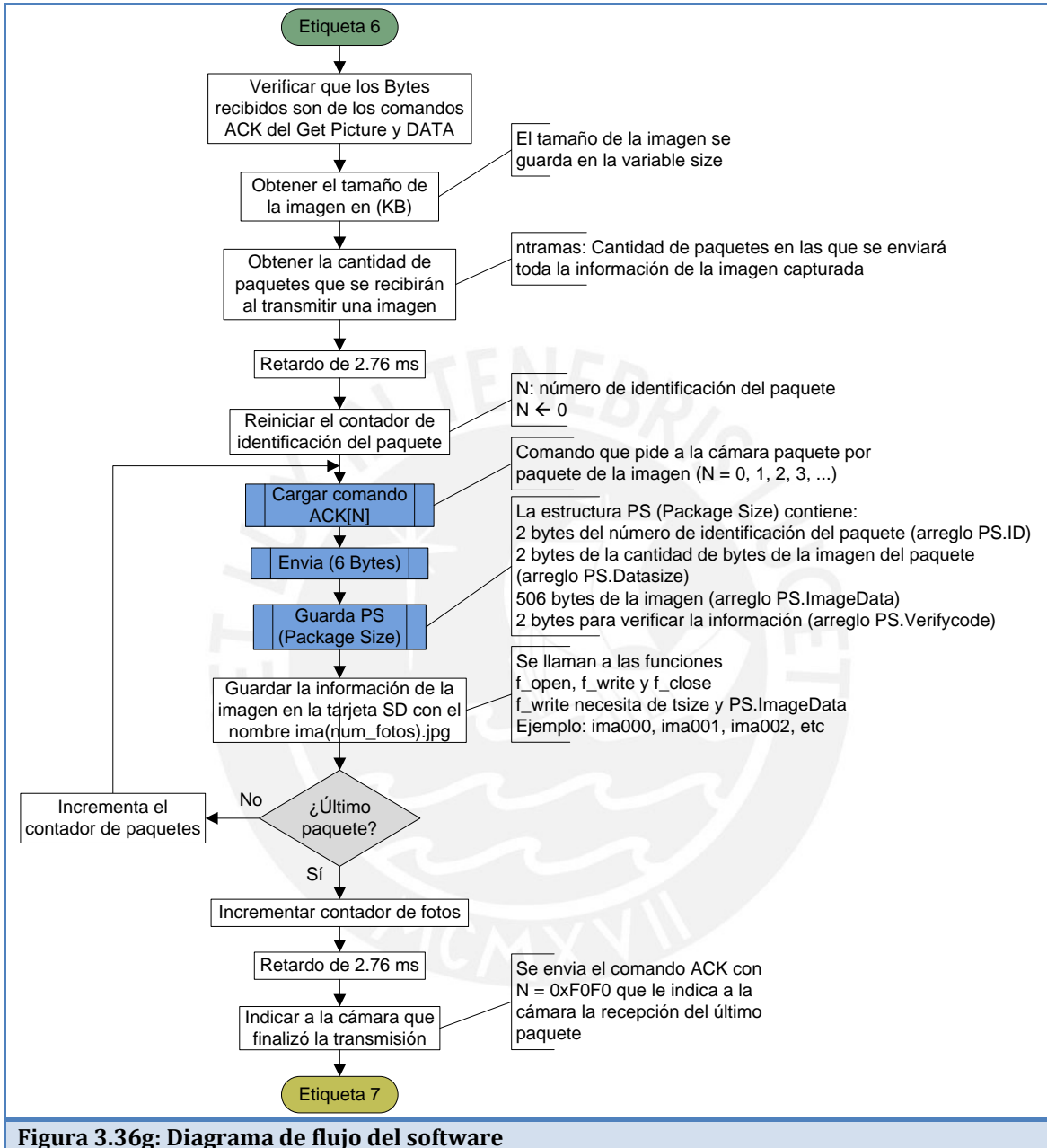


Figura 3.36g: Diagrama de flujo del software

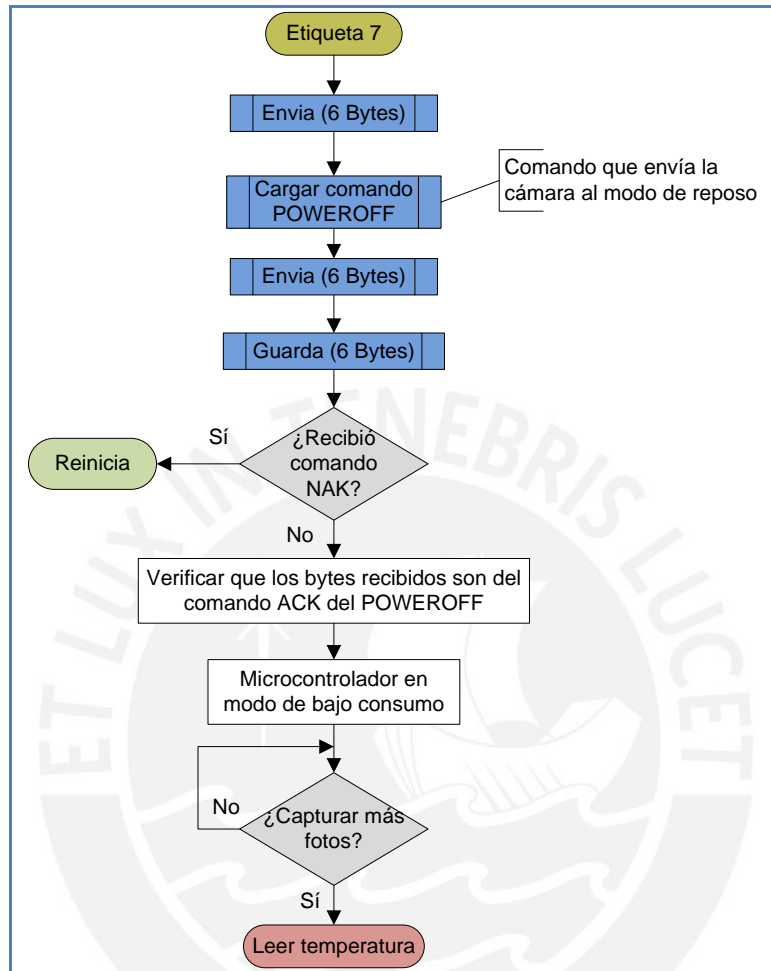


Figura 3.36h: Diagrama de flujo del software

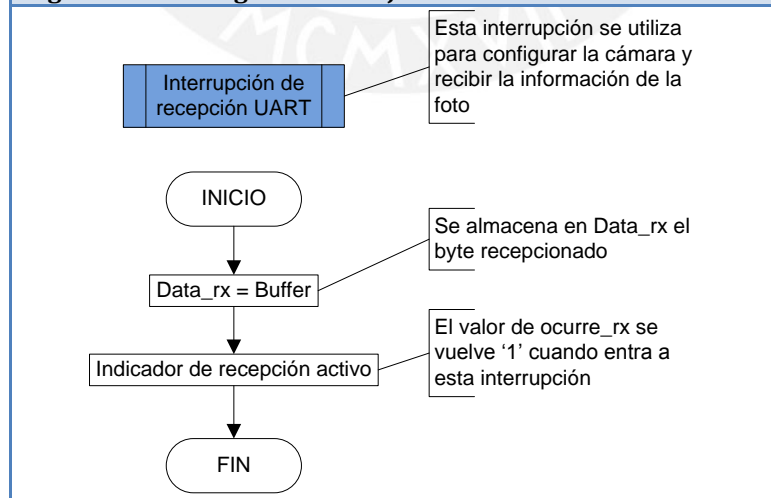


Figura 3.36i: Diagrama de flujo del software

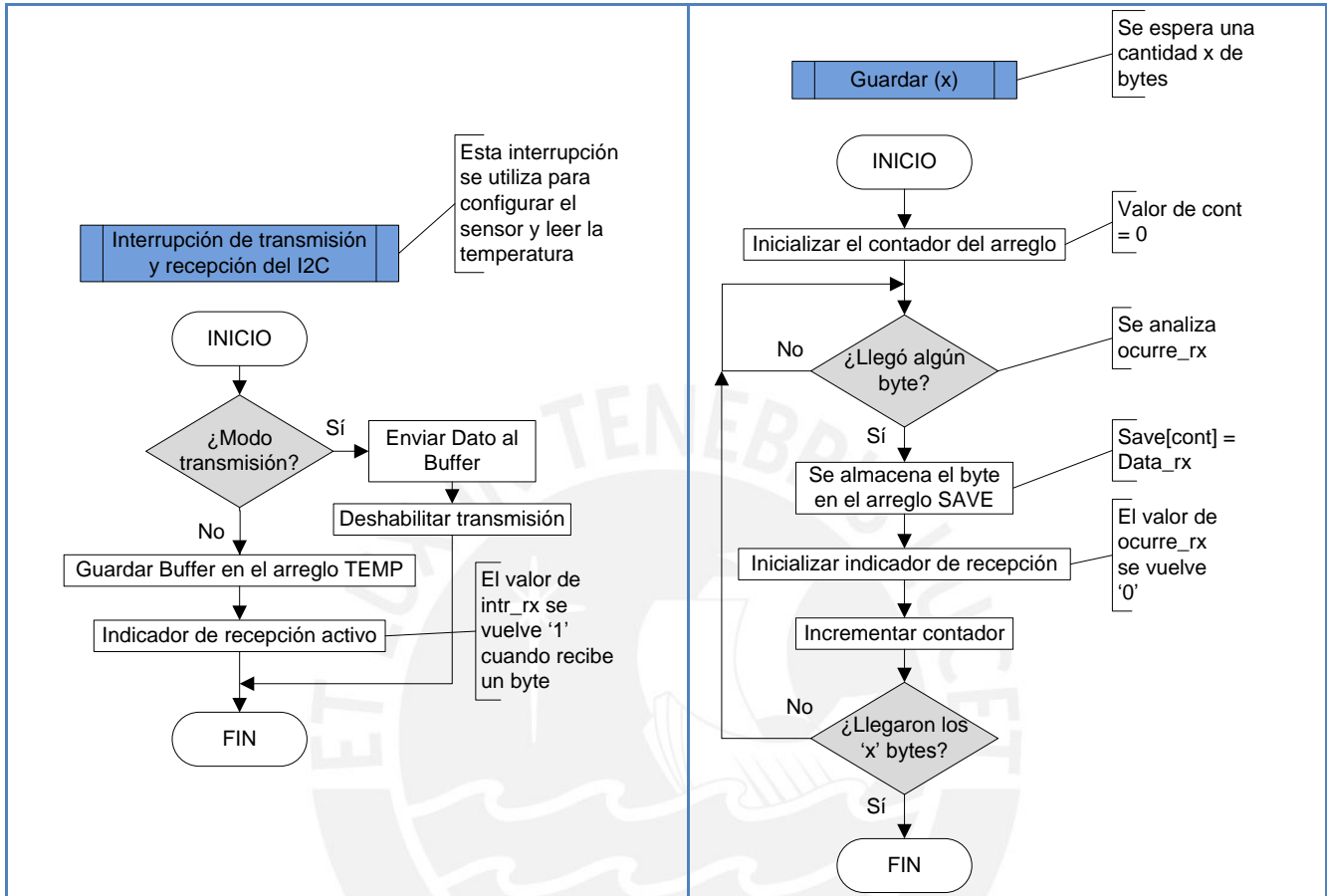


Figura 3.36j: Diagrama de flujo del software **Figura 3.36k: Diagrama de flujo del software**

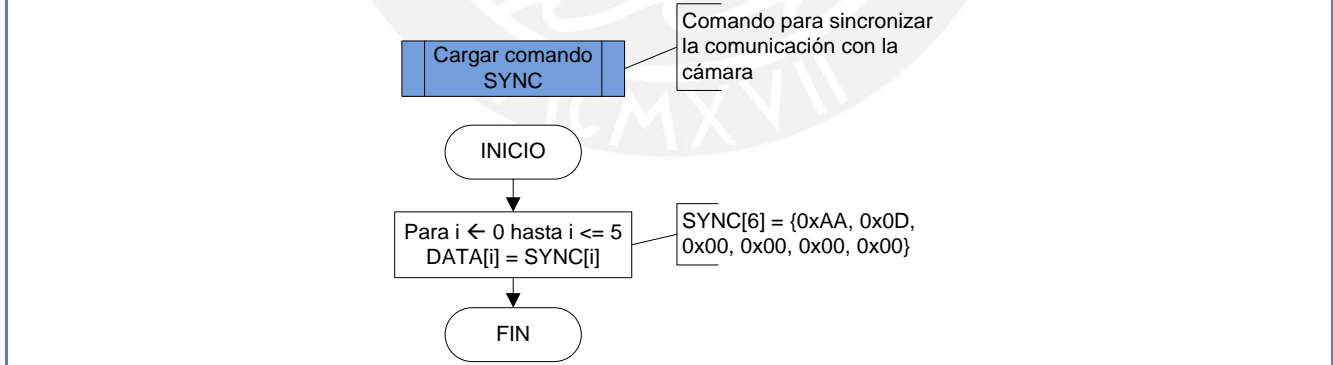


Figura 3.36l: Diagrama de flujo del software

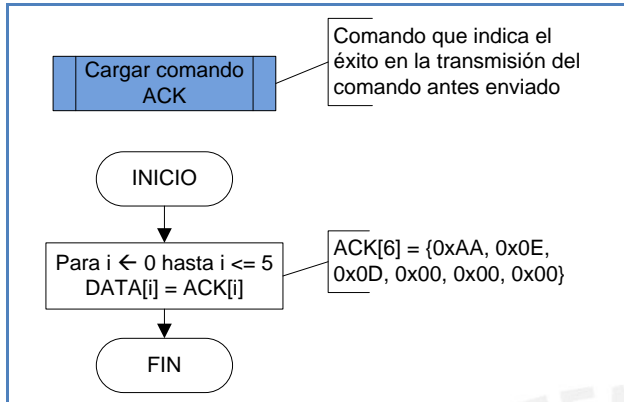


Figura 3.36m: Diagrama de flujo del software

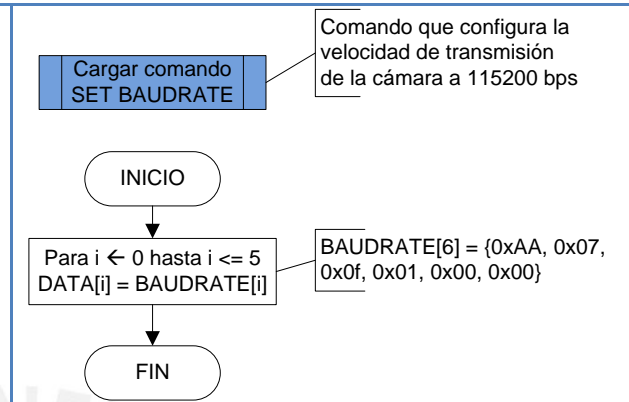


Figura 3.36n: Diagrama de flujo del software

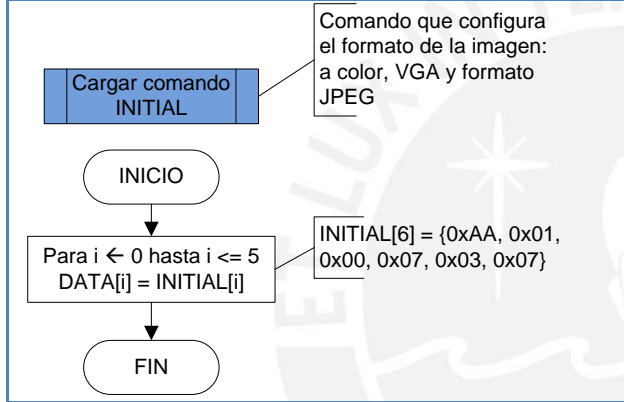


Figura 3.36o: Diagrama de flujo del software

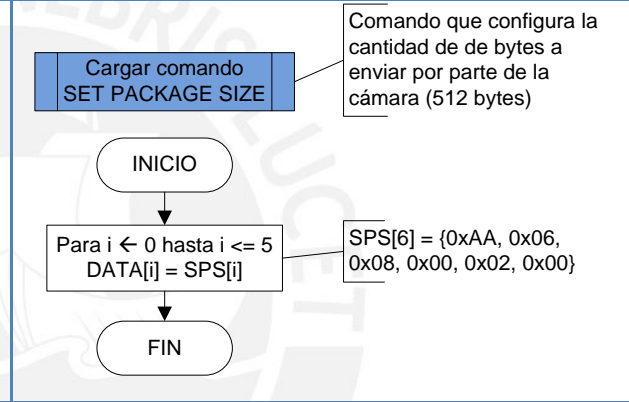


Figura 3.36p: Diagrama de flujo del software

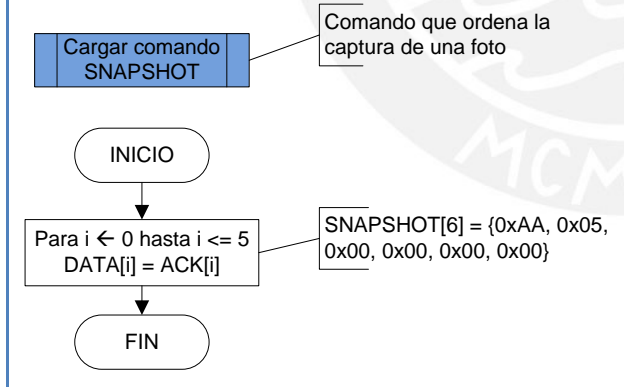


Figura 3.36q: Diagrama de flujo del software

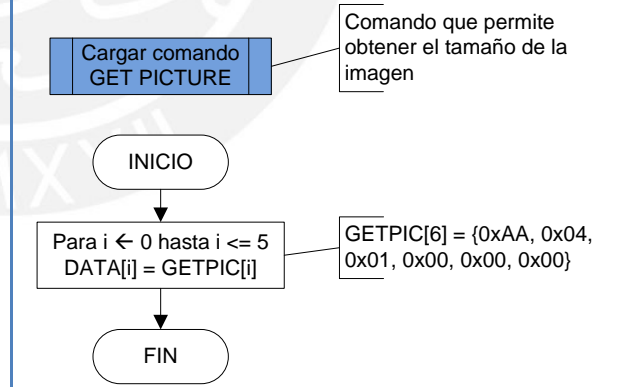


Figura 3.36r: Diagrama de flujo del software

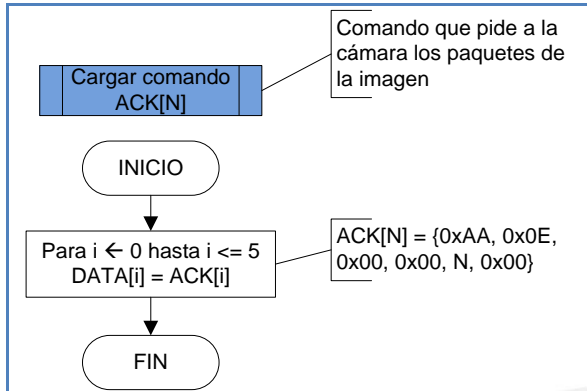


Figura 3.36s: Diagrama de flujo del software

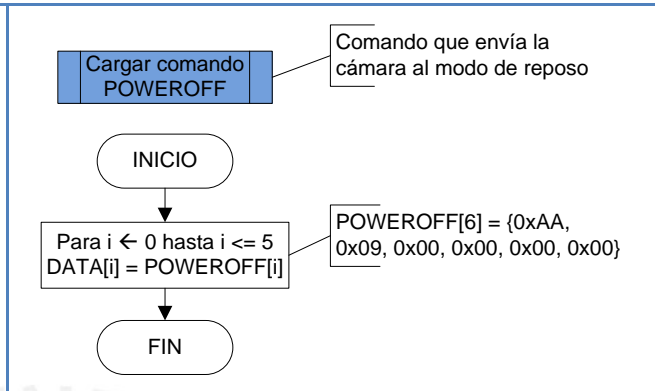


Figura 3.36t: Diagrama de flujo del software

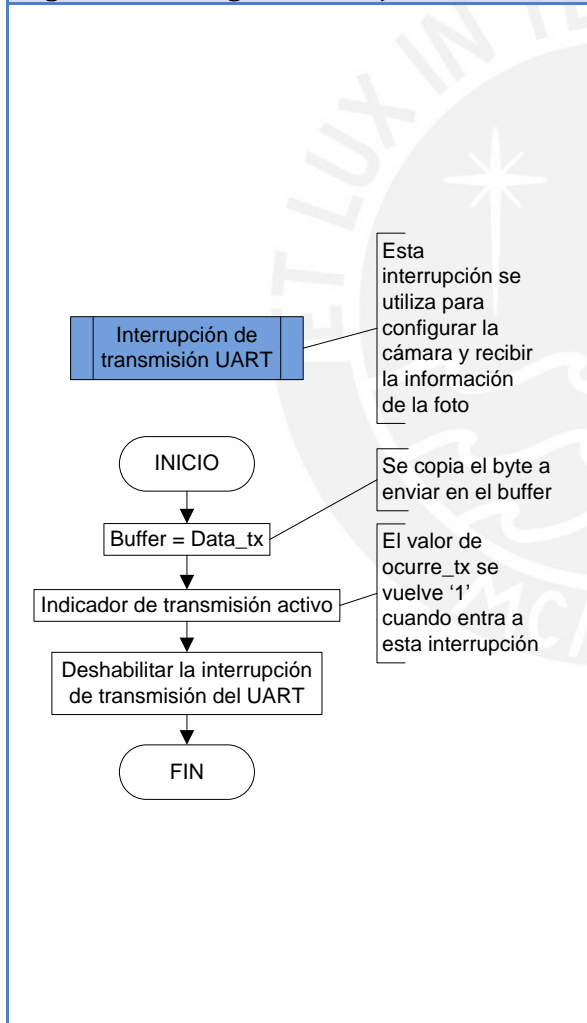


Figura 3.36u: Diagrama de flujo del software

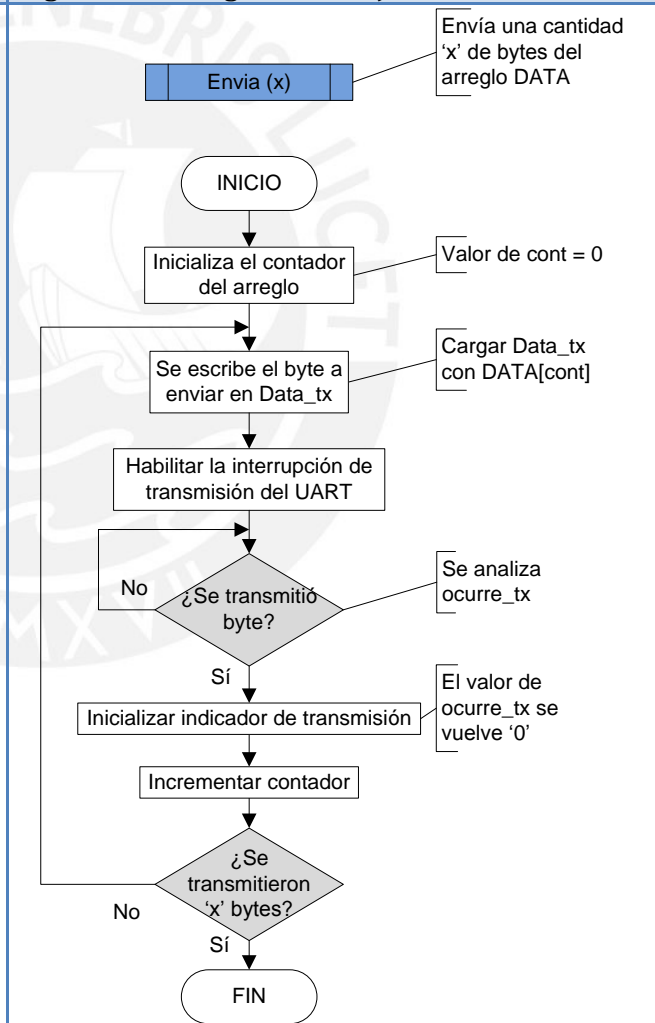


Figura 3.36v: Diagrama de flujo del software

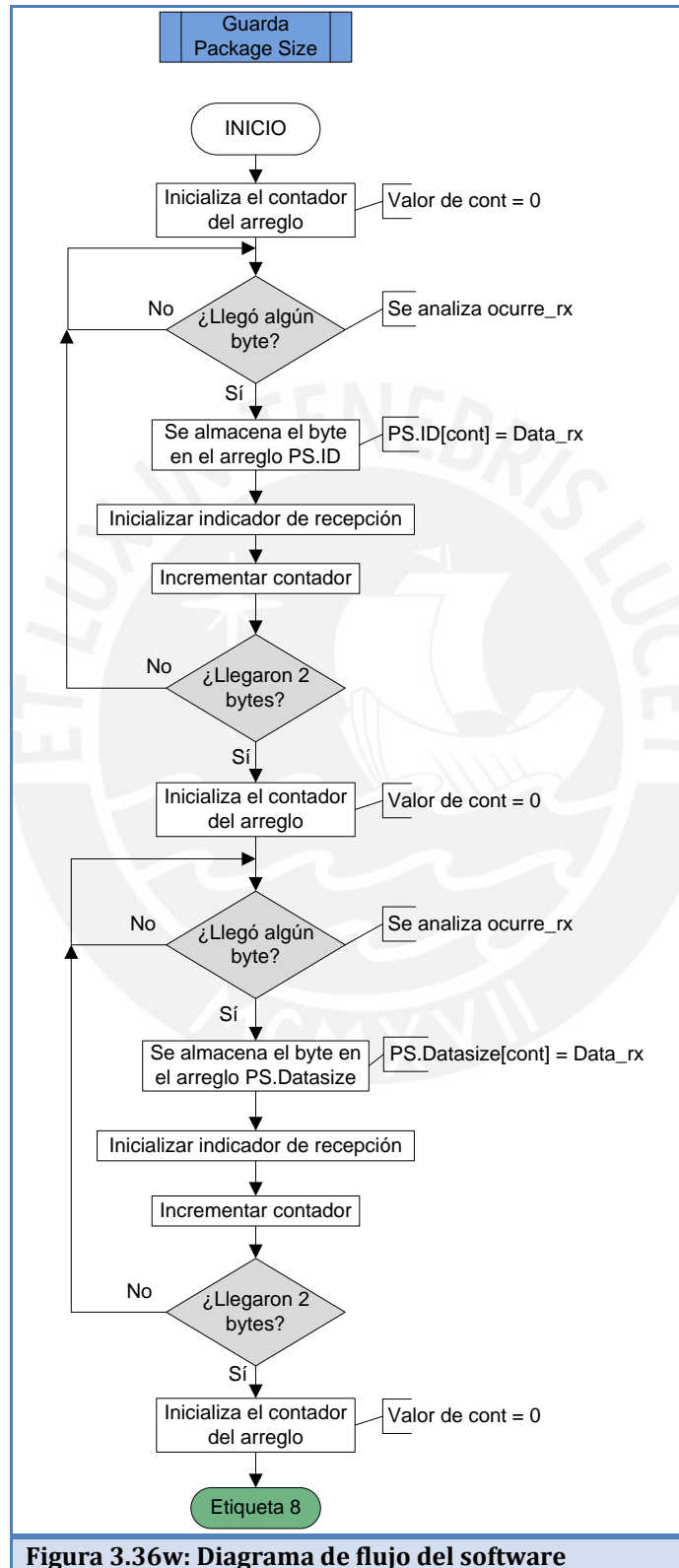
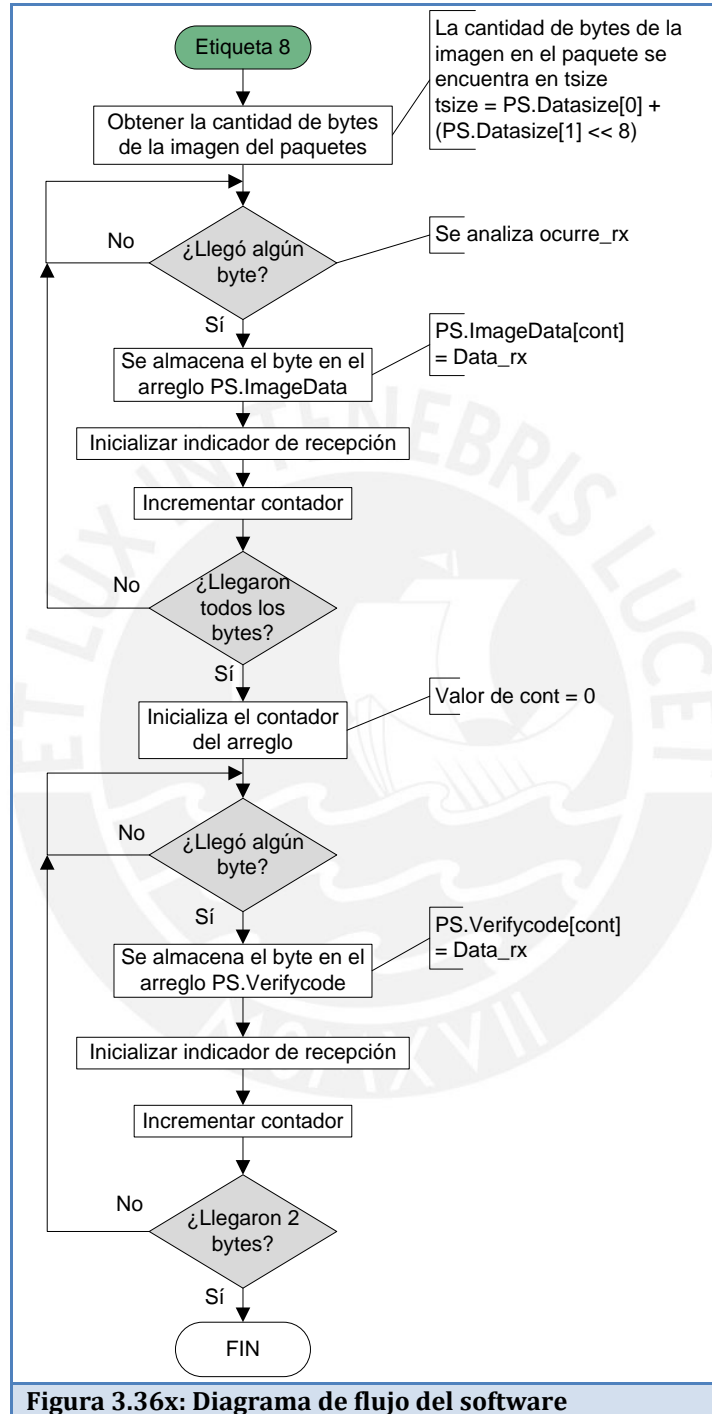


Figura 3.36w: Diagrama de flujo del software



CAPÍTULO 4: Pruebas y Resultados

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de comunicación realizadas entre el módulo de desarrollo, el módulo C328-7640 y el sensor de temperatura como también el proceso de adquisición de la imagen y su almacenamiento en la tarjeta de memoria SD con el prototipo implementado en la *figura 3.34*.

4.1 Prueba 1: Comunicación entre el módulo C328-7640, el sensor TMP100 y el módulo de desarrollo del satélite.

4.1.1 Comunicación entre los módulos C328-7640 y el de desarrollo del satélite

El módulo C328-7640 cuenta con cuatro pines; dos para la alimentación y dos para la comunicación serial por UART (transmisión: TxD y recepción: RxD); el módulo de desarrollo del satélite cuenta con líneas de tensión continua de 3.3V y de referencia; como también con señales de transmisión y recepción por UART del microcontrolador MSP430F2618 en los conectores H1 y H2 mostrados en la *figura 4.1*. Las conexiones realizadas se observan en la *Tabla 4.1* y físicamente en la *figura 4.2*.

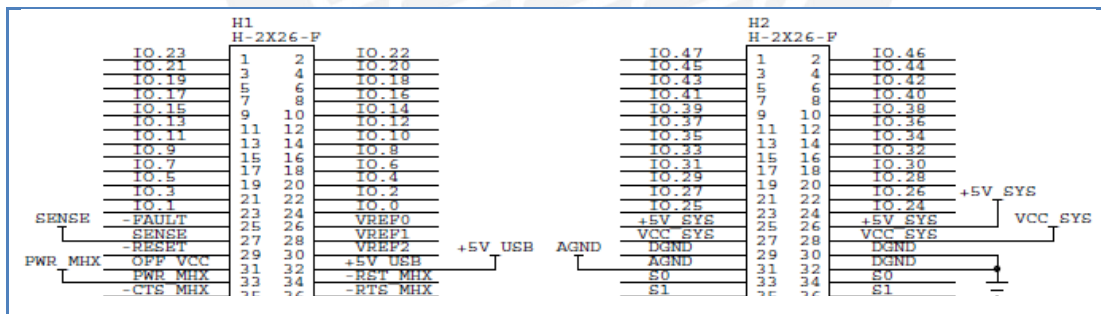


Figura 4.1: Señales existentes en los conectores H1 y H2 del módulo de desarrollo

Tabla 4.1: Conexiones realizadas

Pines del módulo C328-7640	Pines del módulo de desarrollo	Conector
Vcc (cable rojo)	Pin 27 o 28 (3.3V)	H2
TxD (cable amarillo)	Pin 19 (UCA0RXD del MSP430F2618)	H1
RxD (cable verde)	Pin 20 (UCA0TXD del MSP430F2618)	H1
GND (cable negro)	Pin 29, 30, 31 o 32 (GND)	H2

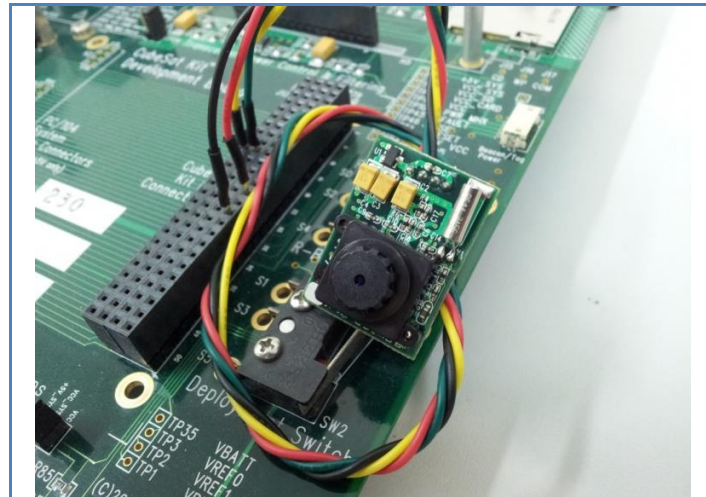


Figura 4.2: Conexiones entre el módulo C328-7640 y el módulo de desarrollo

Se utilizó el entorno “CrossStudio for MSP430” para desarrollar el programa del microcontrolador MSP430F2618 mediante la interfaz MSP-FET430UIF y la librería EFFFs-THIN SD Card, de la empresa HCC-Embedded, para el manejo de información de la tarjeta de memoria SD en un sistema de archivos FAT16. De no contar con esta librería se hubiera desarrollado una biblioteca de funciones respetando el estándar ISO-7816 [24] para el manejo de tarjeta de memoria SD. Se muestra parte del programa en la *figura 4.3*.

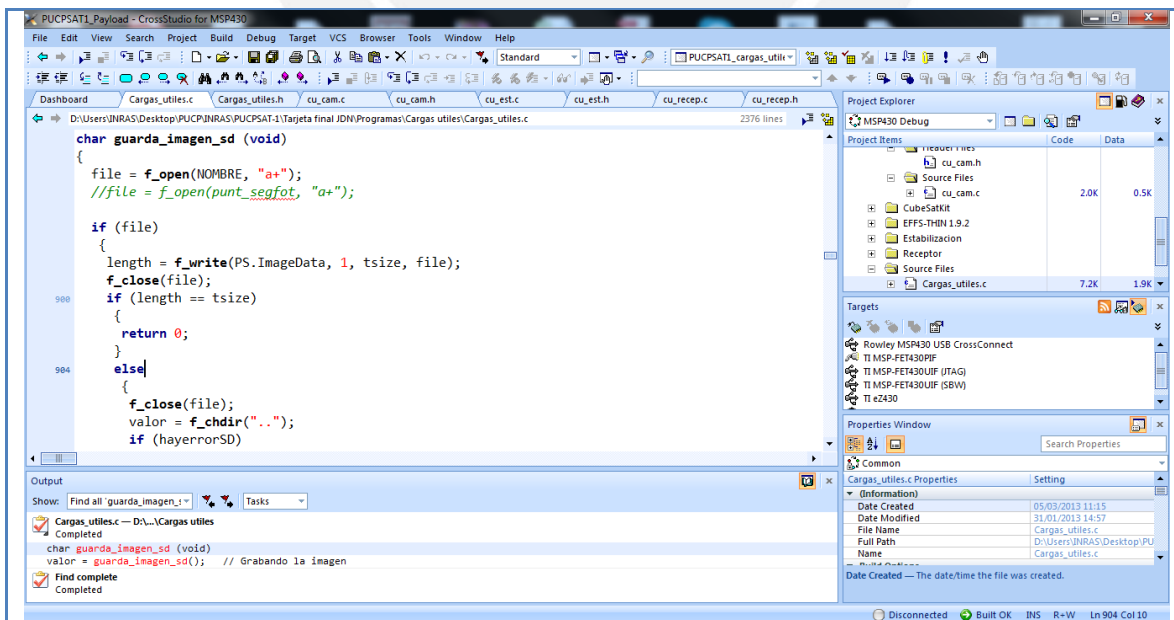


Figura 4.3: Vista del entorno CrossStudio for MSP430 donde se muestra parte del programa que almacena la imagen en la tarjeta de memoria SD

4.1.2 Medición de la temperatura con el sensor conectado al módulo de desarrollo

El sensor de temperatura TMP100 utiliza la comunicación serial I²C y cuenta con seis pines; dos de ellos para la alimentación, otros dos para asignarle una dirección de esclavo en la comunicación I²C (dirección 0x48), y otros dos pines para la comunicación serial I²C. El módulo de desarrollo del satélite cuenta con pines para la alimentación del sensor de 3.3V y la referencia, dos pines en los puertos 3 y 5 configurables para la comunicación serial I²C en los conectores H1 y H2, para este caso se configuraron los pines 29 y 30 del puerto 3. Las conexiones realizadas se observan en la *tabla 4.2* y físicamente en la *figura 4.4*.

Tabla 4.2: Conexiones realizadas

Pines del sensor TMP100	Pines del módulo de desarrollo	Conector
Vcc	Pin 27 o 28 (3.3V)	H2
SCL	Pin 22 (UCB0SCL del MSP430F2618)	H1
SDA	Pin 23 (UCB0SDA del MSP430F2618)	H1
ADD0	Pin 31 (GND)	H2
ADD1	Pin 32 (GND)	H2
GND	Pin 29 (GND)	H2

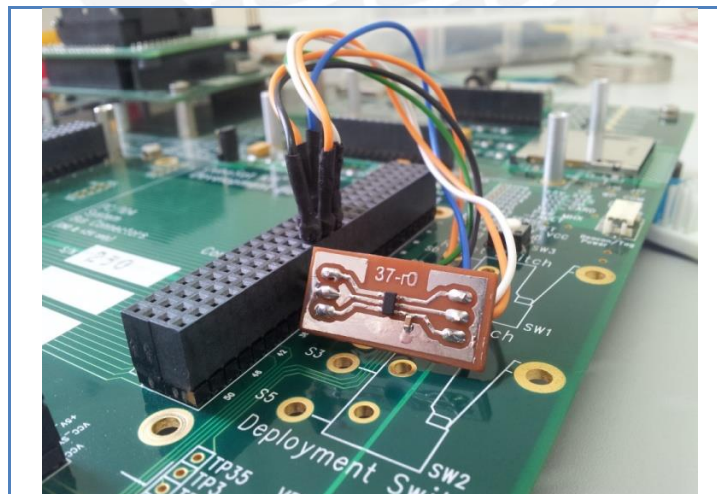
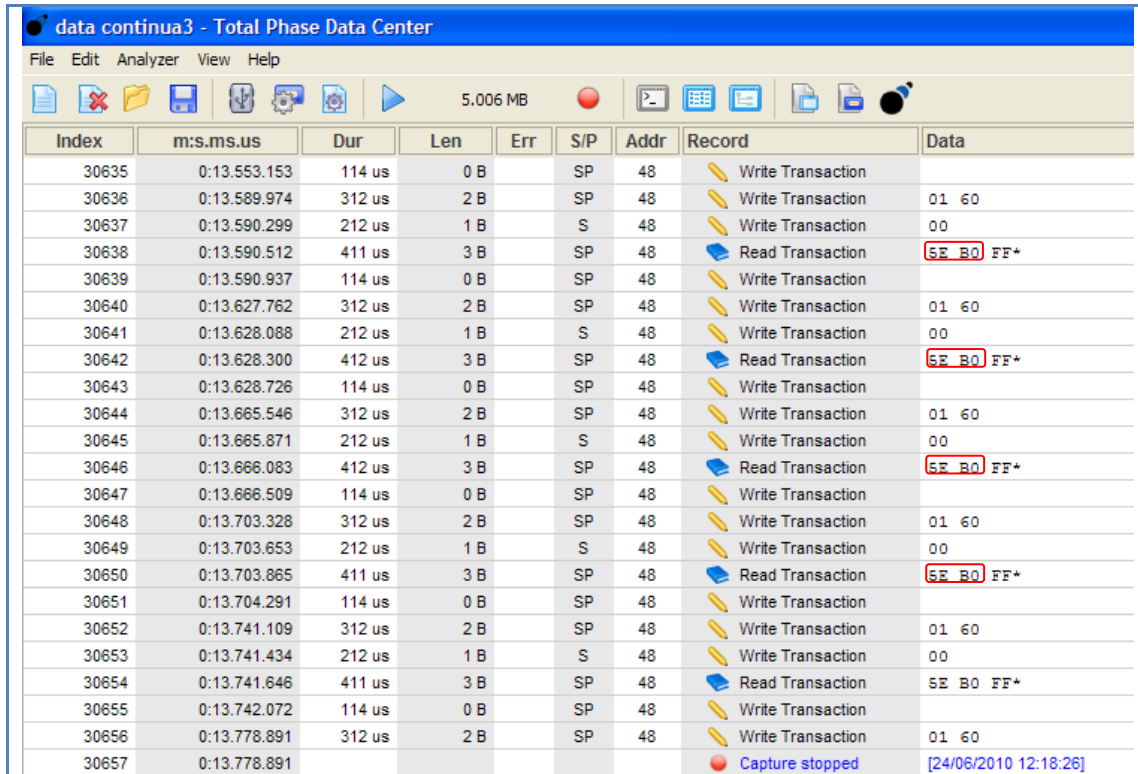


Figura 4.4: Sensor de temperatura TMP100 conectado al módulo de desarrollo del satélite

Se utilizó el programa *Total Phase Data Center* y la interfaz *Beagle* para observar la comunicación serial I²C entre el microcontrolador MSP430F2618 y el sensor de temperatura TMP100; también se utilizó una estación de soldadura de aire caliente marca WELLER para probar la variación de temperatura. El sensor se sometió a una transferencia de calor por convección a una temperatura de 95°C, los resultados obtenidos se muestran en la *figura 4.5*.



Index	m:s.ms.us	Dur	Len	Err	S/P	Addr	Record	Data
30635	0:13.553.153	114 us	0 B		SP	48	Write Transaction	
30636	0:13.589.974	312 us	2 B		SP	48	Write Transaction	01 60
30637	0:13.590.299	212 us	1 B		S	48	Write Transaction	00
30638	0:13.590.512	411 us	3 B		SP	48	Read Transaction	5E B0 FF*
30639	0:13.590.937	114 us	0 B		SP	48	Write Transaction	
30640	0:13.627.762	312 us	2 B		SP	48	Write Transaction	01 60
30641	0:13.628.088	212 us	1 B		S	48	Write Transaction	00
30642	0:13.628.300	412 us	3 B		SP	48	Read Transaction	5E B0 FF*
30643	0:13.628.726	114 us	0 B		SP	48	Write Transaction	
30644	0:13.665.546	312 us	2 B		SP	48	Write Transaction	01 60
30645	0:13.665.871	212 us	1 B		S	48	Write Transaction	00
30646	0:13.666.083	412 us	3 B		SP	48	Read Transaction	5E B0 FF*
30647	0:13.666.509	114 us	0 B		SP	48	Write Transaction	
30648	0:13.703.328	312 us	2 B		SP	48	Write Transaction	01 60
30649	0:13.703.653	212 us	1 B		S	48	Write Transaction	00
30650	0:13.703.865	411 us	3 B		SP	48	Read Transaction	5E B0 FF*
30651	0:13.704.291	114 us	0 B		SP	48	Write Transaction	
30652	0:13.741.109	312 us	2 B		SP	48	Write Transaction	01 60
30653	0:13.741.434	212 us	1 B		S	48	Write Transaction	00
30654	0:13.741.646	411 us	3 B		SP	48	Read Transaction	5E B0 FF*
30655	0:13.742.072	114 us	0 B		SP	48	Write Transaction	
30656	0:13.778.891	312 us	2 B		SP	48	Write Transaction	01 60
30657	0:13.778.891						Capture stopped	[24/06/2010 12:18:26]

Figura 4.5: Vista del entorno Total Phase Data Center donde se observa la temperatura leída del sensor

Se observa que los datos obtenidos por parte del sensor de temperatura son 2 Bytes, en este caso son 0x5E y 0xB0, para realizar la conversión se utilizan los 3 *nibbles* más significativos: 0x5EB0, se convierte a decimal y se multiplica por la resolución del sensor 0.0625°C.

$$0x5EB = 1515 \rightarrow 1515 \times 0.0625^\circ\text{C} = 94.6875^\circ\text{C}$$

Se logró leer la temperatura del sensor conectado al módulo de desarrollo con un error de 0.3125°C de lo programado en la estación de soldadura de aire caliente.

4.2 Prueba 2: Captura de imagen y medición de la temperatura utilizando un circuito impreso elaborado en el instituto de radioastronomía

Para realizar esta prueba se utilizó la tarjeta de la página 56 y se le agregó un pulsador (pin 12, bit 0 del puerto 1 del microcontrolador MSP430F2618 configurado como entrada) para iniciar la captura de las imágenes y un panel de LED's (pines 13, 14 y 15 , bits 1, 2 y 3 del puerto 1) que indican el inicio de la comunicación con la cámara; el momento en el que se captura una imagen (en el *buffer* interno del integrado OV520 con el que cuenta el módulo C328-7640) y el momento en el que se almacena la imagen en la tarjeta SD respectivamente. Para esta prueba la dirección del sensor de temperatura se configuró a 0x49. El ensayo de las pruebas realizadas se muestra en la *figura 4.6*.

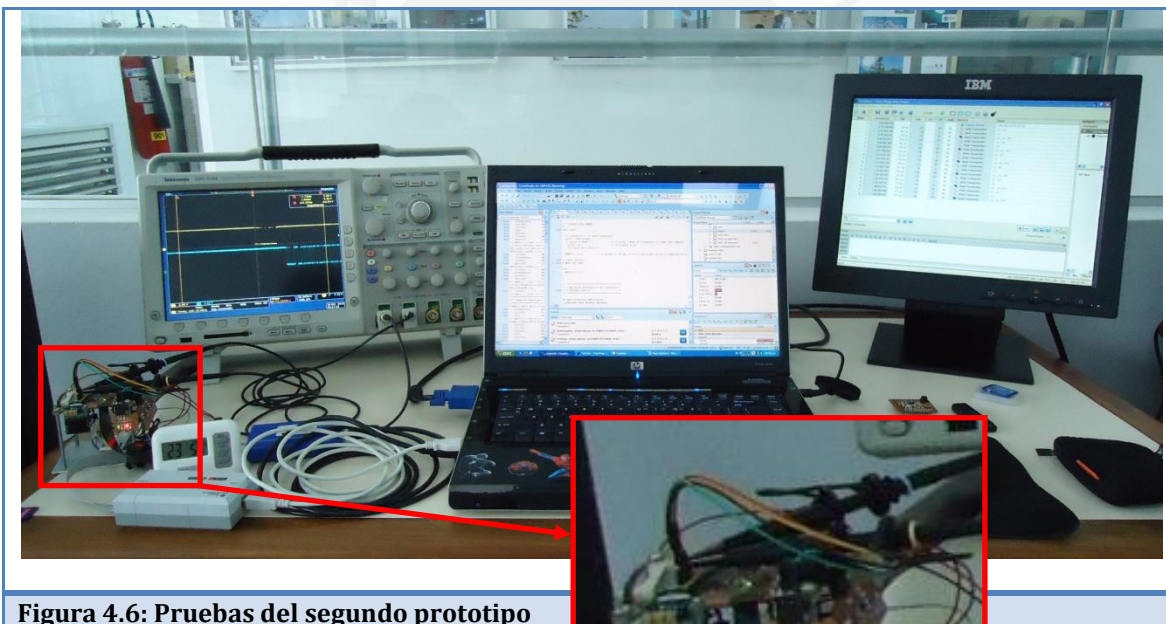


Figura 4.6: Pruebas del segundo prototipo

4.2.1 Resultados obtenidos en la prueba 2

El microcontrolador envía el comando “**SYNC**” a la cámara repetidas veces para empezar la etapa de sincronización como se muestra en la *figura 4.7*. La sincronización es esencial para poder intercambiar información con la cámara.



Figura 4.7: El microcontrolador envía a la cámara nueve ráfagas de comandos SYNC para empezar la etapa de sincronización. El número de ráfagas puede variar.

El comando “**SYNC**” consiste en seis Bytes de información (0xAA 0x0D 0x00 0x00 0x00 0x00) mostrado en la *figura 4.8*.

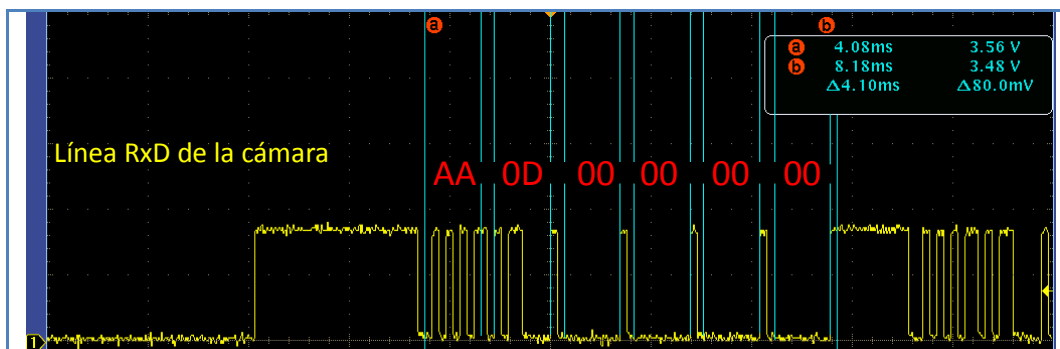
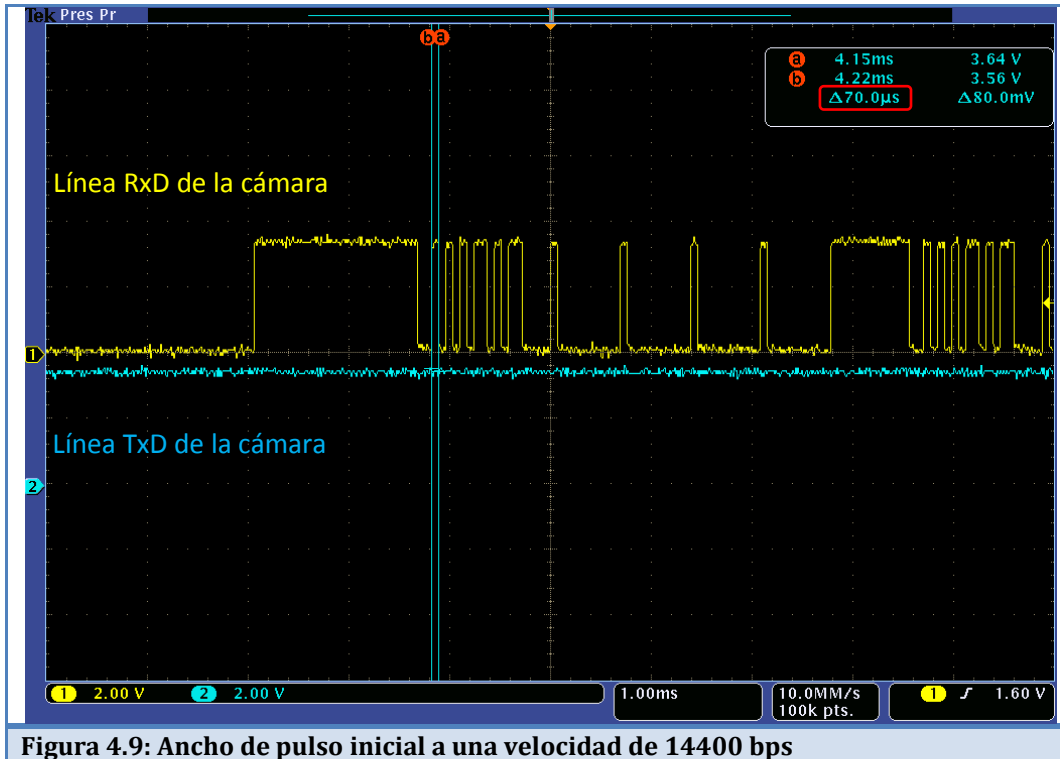
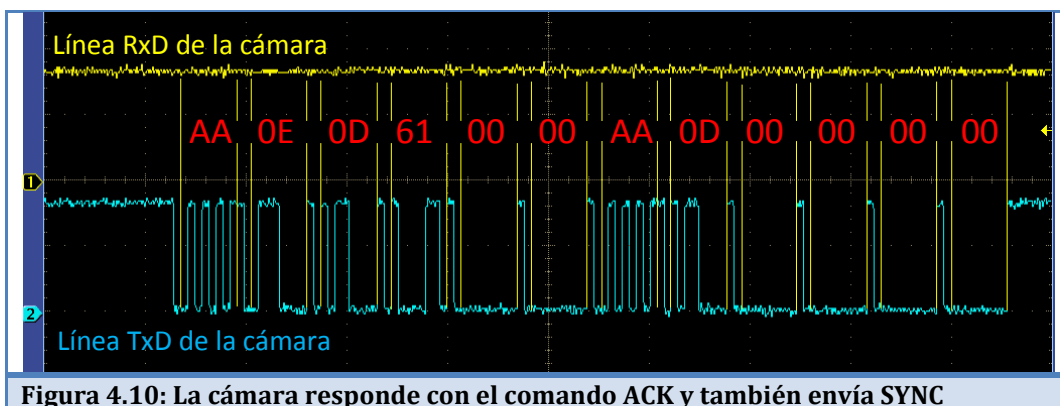


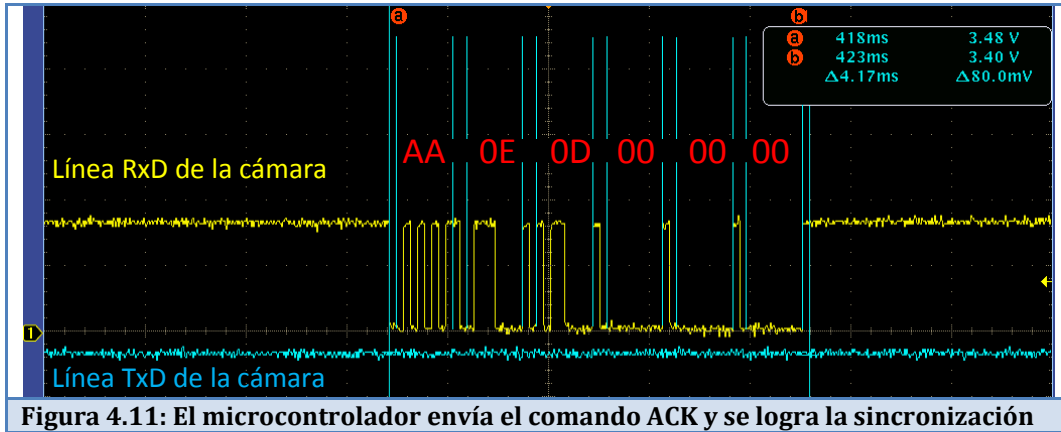
Figura 4.8: Bytes del comando SYNC

El envío de este comando debe hacerse a una velocidad de 14400 bps obteniendo un ancho de pulso promedio de 70us mostrado en el recuadro rojo de la *figura 4.9*.

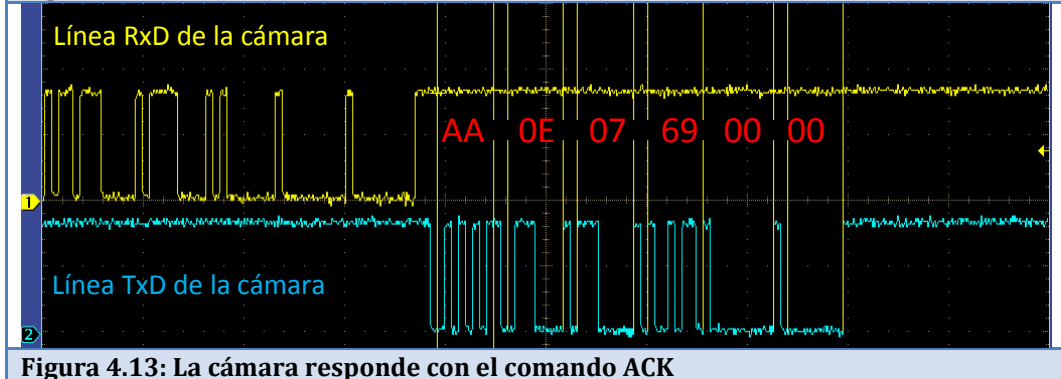
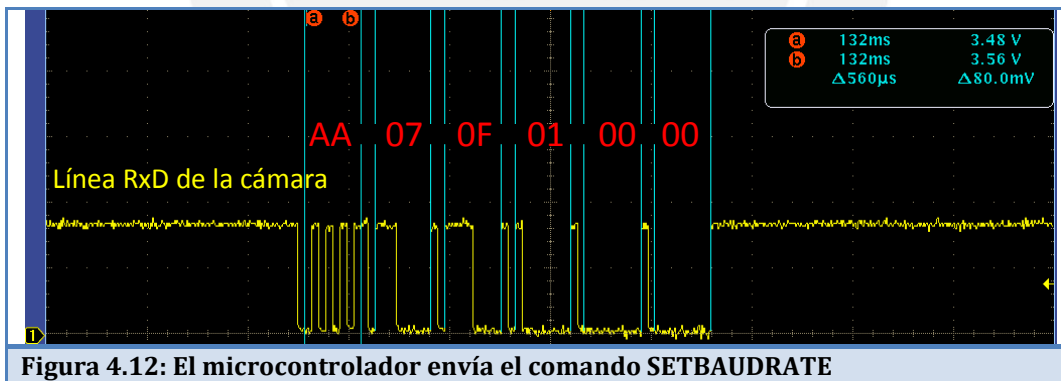


Si se envía con éxito un comando a la cámara, esta responderá con el comando **“ACK”**, indicando que el comando se interpretó correctamente; que consiste en seis Bytes (AA 0E 0D xx 00 00); también envía el comando **“SYNC”** (0xAA 0x0D 0x00 0x00 0x00 0x00) y para lograr la sincronización el microcontrolador debe responder con el comando **“ACK”** (0xAA 0x0E 0x0D xx 0x00 0x00) como se muestran en las *figuras 4.10* y *4.11*.





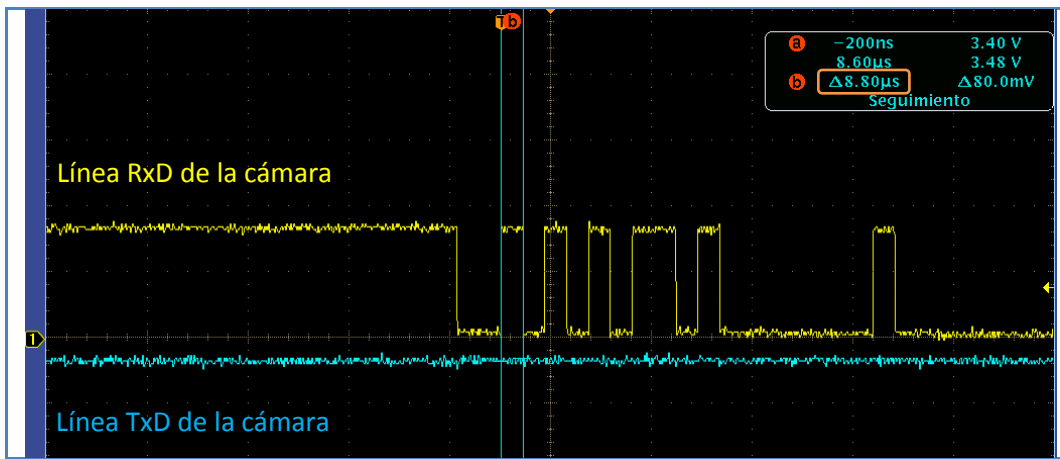
Para reducir el tiempo de comunicación se aumenta la velocidad en bps. Se configura la cámara a la velocidad deseada enviándole el comando **“SET BAUDRATE”** como se muestra en la figura 4.12; este consiste en seis Bytes de información (0xAA 0x07 xx yy 0x00 0x00). Los Bytes xx e yy son aquellos que configuran la velocidad de la cámara; para 115200 bps los valores de xx e yy deben ser de 0F y 01 respectivamente. Al recibir el comando **“ACK”** (0xAA 0x0E 0x07 xx 0x00 0x00) se verifica la modificación y el microcontrolador también se configura a 115200 bps como se muestra en la figura 4.13.



Una vez obtenida la velocidad deseada se envía el comando “**INITIAL**”, para ello se debe esperar un tiempo de entre uno a dos segundos para que la exposición de luz sea la adecuada. En este caso se deja que transcurra un tiempo de 2.58 segundos después del comando “**SET BAUDRATE**” como se observa en el recuadro naranja de la *figura 4.14*.



Se puede notar que el ancho del pulso ha disminuido a 8.8us en el recuadro naranja de la *figura 4.15*.



El comando “**INITIAL**” consiste en seis Bytes de información (0xAA 0x01 0x00 xx yy zz) como se muestra en la *figura 4.16*. Los Bytes xx yy zz indican el formato de la imagen y la resolución si se comprime o no. Las imágenes comprimidas tienen un menor tamaño que las imágenes no comprimidas por ello se elige la compresión JPEG y una resolución de 640x480; para ello los valores de los Bytes xx y zz deben ser 07 y 07 respectivamente; el valor del Byte yy no afecta la configuración para este caso.

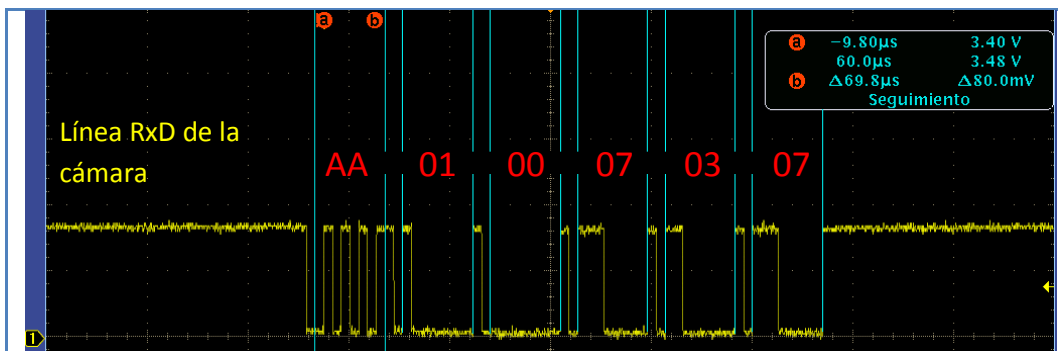


Figura 4.16: El microcontrolador envía el comando INITIAL

La cámara responde con el comando “**ACK**” (0xAA 0x0E 01 xx 0x00 0x00) indicando que se ha configurado los parámetros especificados como se muestra en la *figura 4.17*.

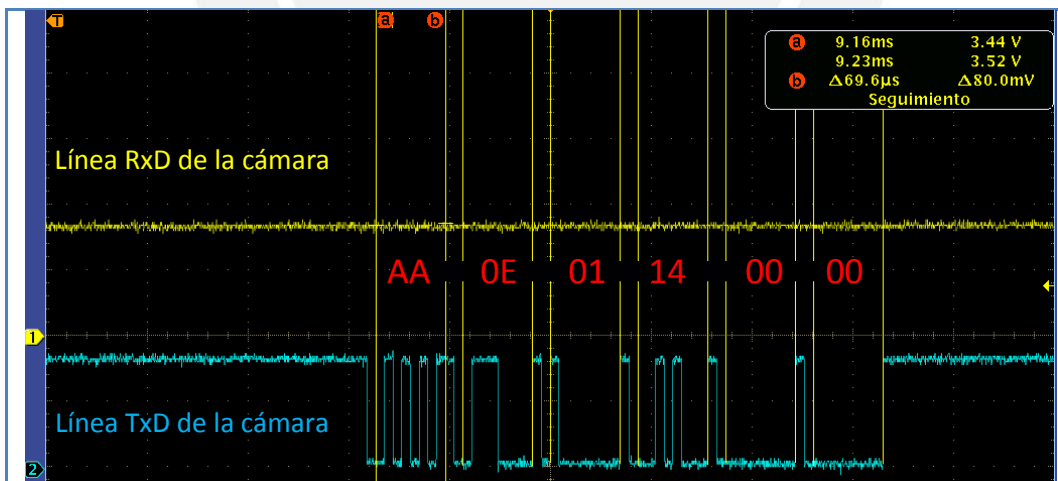
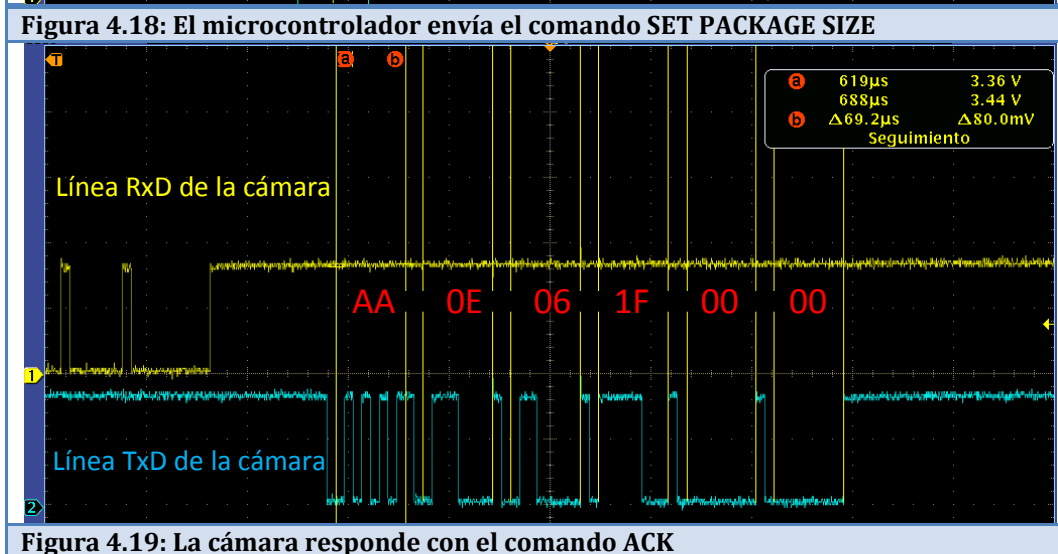
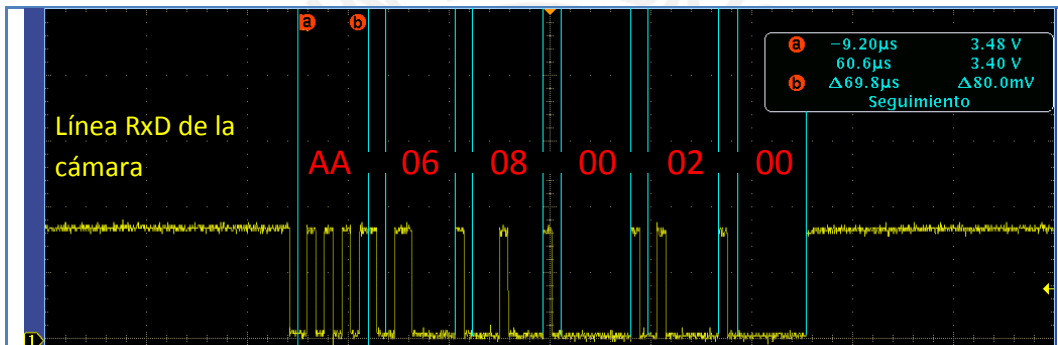


Figura 4.17: La cámara responde con el comando ACK

Una vez configurado el formato de la imagen se debe configurar la cantidad de Bytes de información que va a transmitir la cámara (denominado “*Package Size*”) cuyo contenido es la dirección del paquete definido como “*Package ID*”, la cantidad de Bytes que se envía definido como “*Data Size*”, la cantidad de Bytes de información de la imagen definida como “*Image Data*”

y un código de verificación que indica si la información recibida es correcta definida como "Verify Code". Se debe saber que la memoria SD almacena paquetes con un máximo de 512B y debe tener el formato FAT16, por ello se configura la cámara para que el "Package Size" sea de 512B donde 506B son información de la imagen. Para ello se envía el comando "SET PACKAGE SIZE", que consiste en seis Bytes de información (0xAA 0x06 0x08 xx yy 0x00) como se muestra en la figura 4.18. Los Bytes xx e yy indican el número de Bytes que se desea transmitir; 512B es la cantidad a transmitir que en hexadecimal es 0x200 entonces xx e yy son 00 y 02 respectivamente. La respuesta "ACK" por parte de la cámara confirma la configuración como se muestra en la figura 4.19.



Se envía la orden para capturar una imagen y almacenarla en el buffer de la cámara mediante el comando "SNAPSHOT" como se muestra en la figura 4.20; consiste en seis Bytes de información (0xAA 0x05 xx yy zz 0x00) donde xx indica el tipo de disparo, mientras yy y zz indican la cantidad de disparos que se realizarán previo almacenamiento de la imagen, para

este caso dichos valores son 00. La cámara responderá con el comando **“ACK”** (0xAA 0x0E 0x05 xx 0x00 0x00) cuando la captura se haya realizado como se muestra en la *figura 4.21*.

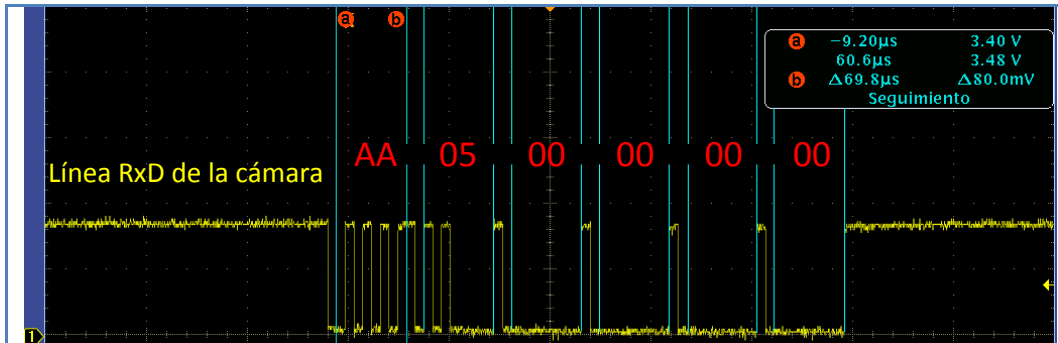


Figura 4.20: El microcontrolador envía el comando SNAPSHOT

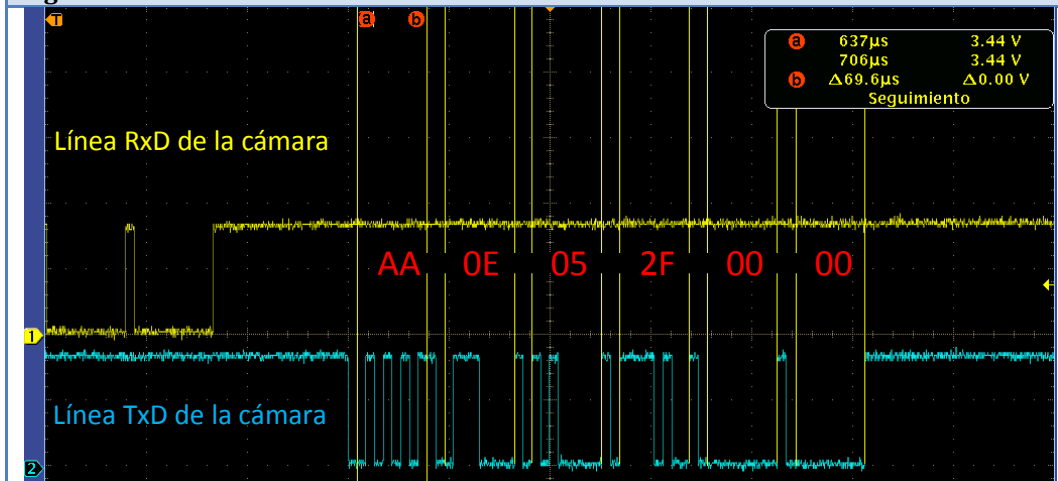


Figura 4.21: La cámara responde con el comando ACK

Una vez almacenada la imagen en el *buffer* se pide su envío mediante el comando **“GET PICTURE”**, que consiste en seis Bytes de información (0xAA 0x04 0x01 0x00 0x00 0x00) como se muestra en la *figura 4.22*. La respuesta por parte de la cámara no solo será el comando **“ACK”** (0xAA 0x0E 0x04 0x05 0x00 0x00) sino también el comando **“DATA”** con seis Bytes de información (0xAA 0x0A 0x01 0x70 0x6A 0x00) como se muestran en las *figuras 4.23 y 4.24*, este último comando indica que la información almacenada pertenece a una foto o un video y el tamaño total del archivo.

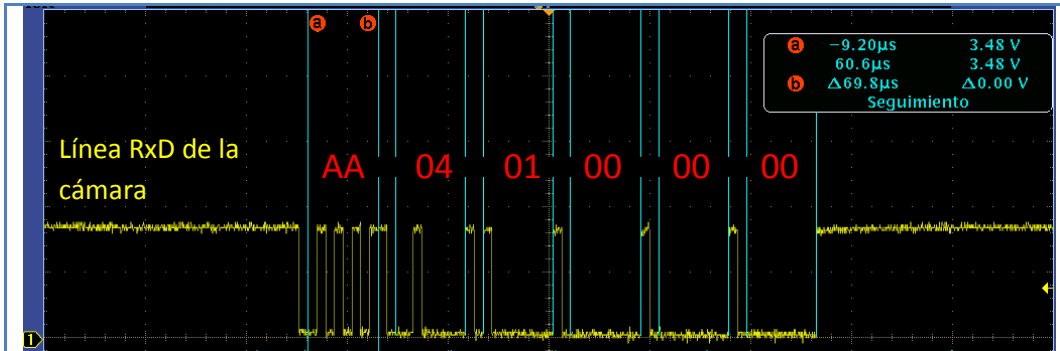


Figura 4.22: El microcontrolador envía el comando GETPICTURE

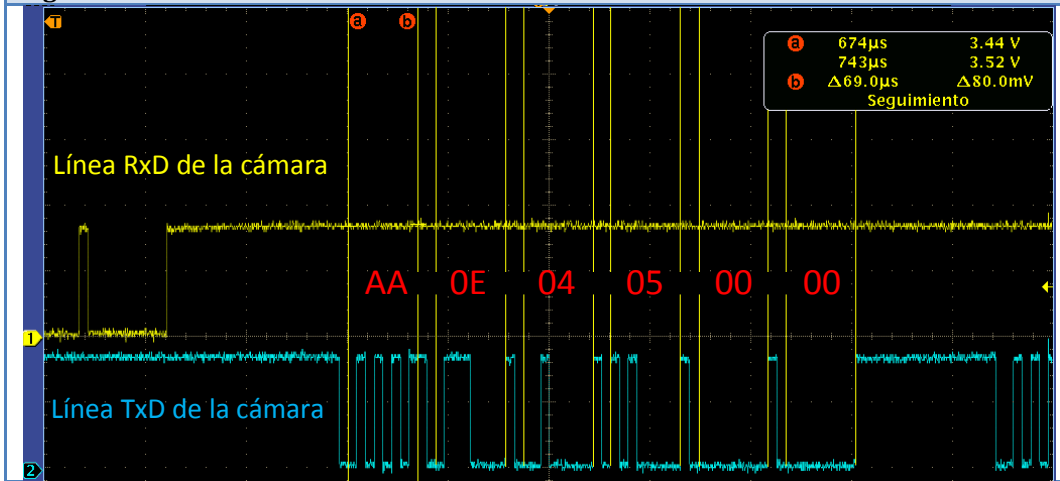


Figura 4.23: La cámara responde con el comando ACK



Figura 4.24: La cámara también envía el comando DATA

El tamaño de la imagen se encuentra en los tres últimos Bytes del comando **“DATA”** como se muestra en la *figura 4.24*, al juntarlos se obtiene el valor 0x006A70; al hacer la conversión a decimal se obtiene 27248B; es decir 27,248KB. La información de la imagen se enviará en 53 paquetes de 506B ($27248/506 + 1$) y un último paquete de 430B; es decir el microcontrolador después de recibir el comando **“DATA”** enviará 54 comandos **“ACK”** (AA 0E 00 00 xx yy) cuyos valores xx yy varían desde 0 hasta 53 como se muestran en la *tabla 5*, donde xx es el Byte menos significativo e yy es el Byte más significativo; la cámara responderá a cada comando **“ACK”** como se muestra en la *figura 4.25*, uno por uno con la información de la imagen como se observa en la *figura 4.26*.

Tabla 5

Paquete	xx	yy	Paquete	xx	yy	Paquete	xx	yy	Paquete	xx	yy
00	00	00	14	14	00	28	28	00	42	42	00
01	01	00	15	15	00	29	29	00	43	43	00
02	02	00	16	16	00	30	30	00	44	44	00
03	03	00	17	17	00	31	31	00	45	45	00
04	04	00	18	18	00	32	32	00	46	46	00
05	05	00	19	19	00	33	33	00	47	47	00
06	06	00	20	20	00	34	34	00	48	48	00
07	07	00	21	21	00	35	35	00	49	49	00
08	08	00	22	22	00	36	36	00	50	50	00
09	09	00	23	23	00	37	37	00	51	51	00
10	10	00	24	24	00	38	38	00	52	52	00
11	11	00	25	25	00	39	39	00	53	53	00
12	12	00	26	26	00	40	40	00			
13	13	00	27	27	00	41	41	00			

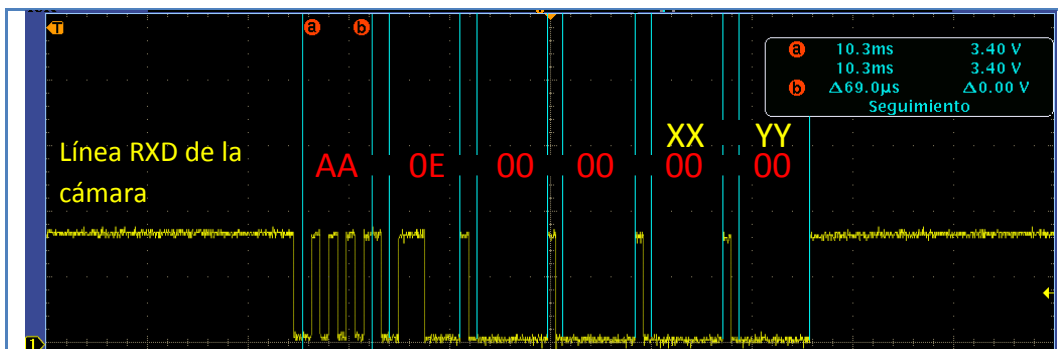


Figura 4.25: Contenido del primer comando ACK que envía la cámara

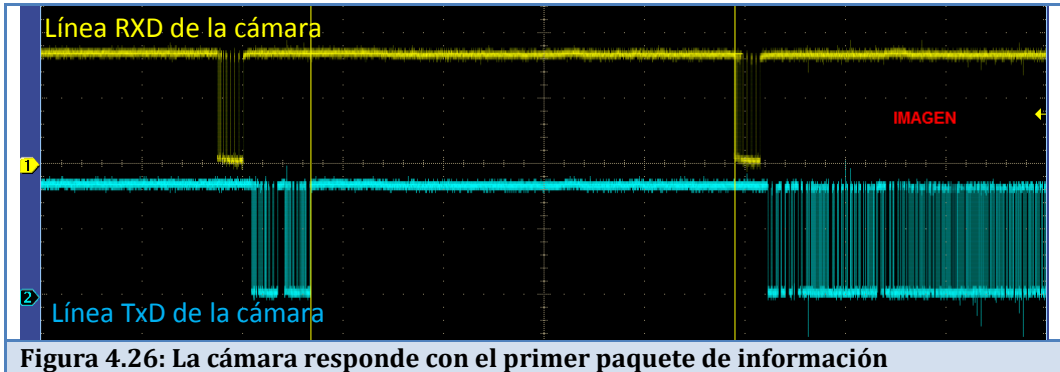


Figura 4.26: La cámara responde con el primer paquete de información

Para indicarle a la cámara que la imagen llegó completa se envía un comando **“ACK”** final (0xAA 0x0E 0x00 0x00 0xF0 0xF0) mostrado en la figura 4.27.



Figura 4.27: Bytes del último comando ACK para finalizar la recepción de la imagen

Una vez obtenida la imagen, para evitar consumir más energía se envía el comando **“POWER OFF”** con seis Bytes de información (0xAA 0x09 0x00 0x00 0x00 0x00) mostrado en la figura 4.28; la cámara enviará el comando **“ACK”** (0xAA 0x0E 0x09 xx 0x00 0x00) confirmando que acató la orden como se aprecia en la figura 4.29.



Figura 4.28: El microcontrolador envía el comando POWEROFF

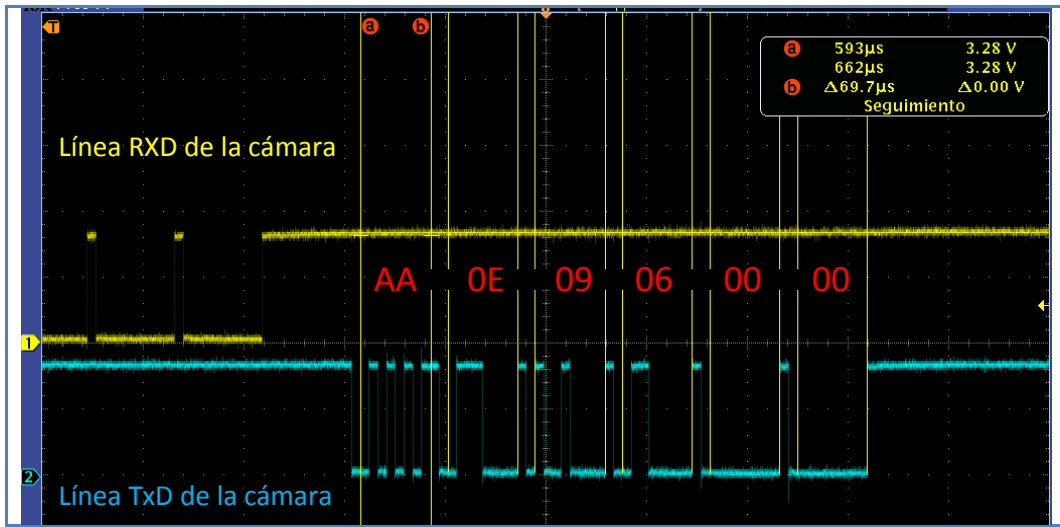


Figura 4.29: La cámara responde con el comando ACK

La imagen capturada se almacena en la tarjeta de memoria SD de 512KB en la dirección **CAMARAIFOTOS** con el nombre **IMA0000** como se aprecia en la *figura 4.30*.



Figura 4.30: Archivo IMA0000 capturado por la cámara en esta prueba

En la *figura 4.31* se observa parte del programa que contiene el nombre de la imagen.

```

460  /* Grabando La imagen
      OS_SignalBinSem(RSRC_SD_CARD_P);
      OS_WaitBinSem(RSRC_SD_CARD_P, OSNO_TIMEOUT);
      if (num_fotos == 0) {file = f_open("ima0000.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
    
```

Figura 4.31: Parte del programa que indica el nombre del archivo

Se cuentan con variables como *size* y *num_fotos*, las que contienen el tamaño de la imagen y la cantidad de imágenes capturadas las que se muestran en la *figura 4.32*.

Name	Value
n_nak	0x00
num_fotos	0x01
size	27248
cont_tsync	0x0a
cont_csync	0x00

Figura 4.32: Tamaño de la imagen en Bytes

Los nombres de las demás imágenes se obtendrán al incrementar en una unidad la parte numérica del nombre como se observa en la *figura 4.33*.

```

if (num_fotos == 0) {file = f_open("ima0000.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 1) {file = f_open("ima0001.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 2) {file = f_open("ima0002.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 3) {file = f_open("ima0003.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 4) {file = f_open("ima0004.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 5) {file = f_open("ima0005.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 6) {file = f_open("ima0006.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 7) {file = f_open("ima0007.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 8) {file = f_open("ima0008.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 9) {file = f_open("ima0009.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 10) {file = f_open("ima0010.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 11) {file = f_open("ima0011.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 12) {file = f_open("ima0012.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 13) {file = f_open("ima0013.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
if (num_fotos == 14) {file = f_open("ima0014.jpg", "a+"); goto guarda_imagen;}
    
```

Figura 4.33: Parte del programa que muestra los nombres de los archivos

A continuación en la *figura 4.34* se muestran las propiedades en el sistema operativo Microsoft Windows 7 de la imagen capturada, se observa que el nombre de la imagen y su tamaño coinciden con los datos mostrados en las *figuras 4.31* y *4.32*.

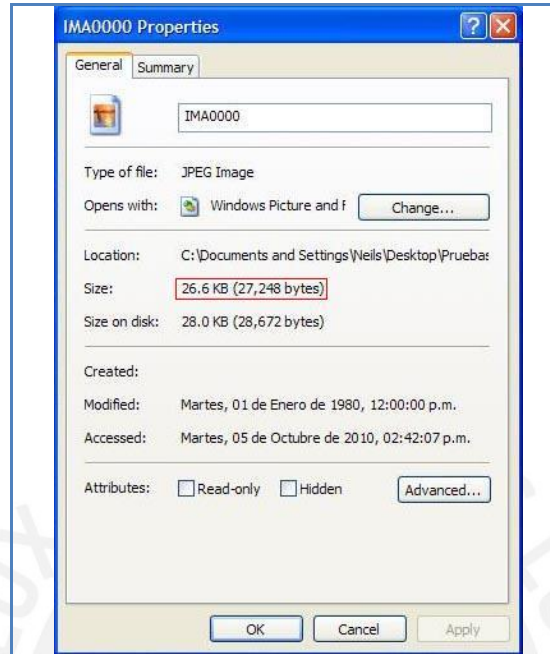


Figura 4.34: Propiedades del archivo

En la *figura 4.35* se muestra la lectura del sensor de temperatura.




1	0:19.258.877	235 us	2 B	SP	49	 Write Transaction	01 60
2	0:19.259.114	161 us	1 B	S	49	 Write Transaction	00
3	0:19.259.275	310 us	3 B	SP	49	 Read Transaction	17 E0 FF*

Figura 4.35: Temperatura al momento de capturar el archivo IMA0000

Los Bytes mostrados en el recuadro rojo se utilizan para obtener el valor de la temperatura:
 $0x17E = 382$, $382 \times 0.0625 = 23.875^{\circ}\text{C}$ con $\pm 2^{\circ}\text{C}$ si $[-25^{\circ}\text{C}$ a $85^{\circ}\text{C}]$

Se compara este valor con otros dos sensores que se encontraban dentro de la habitación, como se muestra en las *figuras 4.36* y *4.37*.



Figura 4.36: Sensor en la pared



Figura 4.37: Sensor cerca a la tarjeta

De todas las pruebas realizadas la foto con más información fue capturada el día 24 de septiembre del 2010 con un total de 79.4KB; este dato se utilizará para elegir la capacidad de la tarjeta de memoria. Una de 512MB sería la más indicada por dos razones:

Permitirá almacenar un promedio de más de 6000 fotos y debido a su poca capacidad a comparación de memorias más actuales, tiene más posibilidades de resistir los rayos cósmicos debido a la relación de capacidad de la memoria y tamaño de los transistores internos, a menor capacidad mayor es el tamaño de los transistores. Se realizaron otras capturas a una distancia de 20cm de la maqueta del satélite teniendo como fondo el edificio Mc Gregor, el que simula el planeta Tierra como se muestra en la *figura 4.38*; también se quería comprobar la capacidad del programa para poder almacenar imágenes cuya información está incompleta, esto con la finalidad de asegurar el almacenamiento de cualquier imagen como se muestra en la *figura 4.39*.



Figura 4.38: Foto de la maqueta del satélite



Figura 4.39: Foto incompleta capturada

A continuación se muestran otras fotos capturadas con una resolución VGA:



Figura 4.40: Foto capturada el 24/06/10



Figura 4.41: Foto capturada el 02/08/10



Figura 4.42: Foto capturada el 09/09/10



Figura 4.43: Foto capturada el 11/02/11



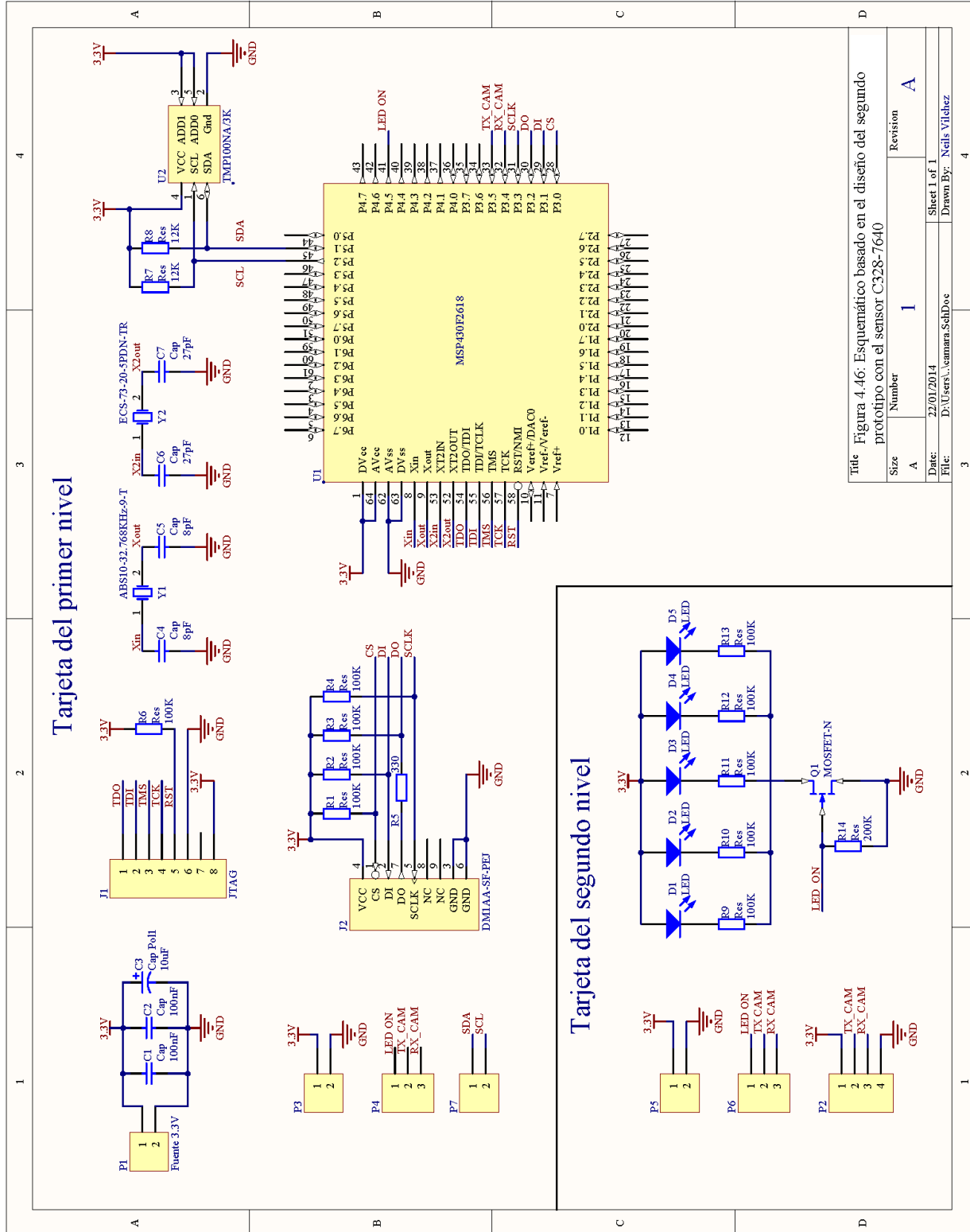
Figura 4.44: Foto capturada el 16/12/10



Figura 4.45: Foto capturada el 16/12/10

Finalmente para cumplir por completo con el objetivo final de la tesis, se elaboró el circuito mostrado en la *figura 4.46* basado en el diseño del punto 3.5.2 de la página 53, con el que se realizaron las pruebas del capítulo 4; todo esto, con el propósito de que el circuito ocupe un espacio menor al de un octavo de volumen de un CubeSat.

Revisar el plano 5 para una mejor visualización.



Se muestra el circuito elaborado en el INRAS-PUCP en la *figuras 4.47a, b, c, d, e y f.*

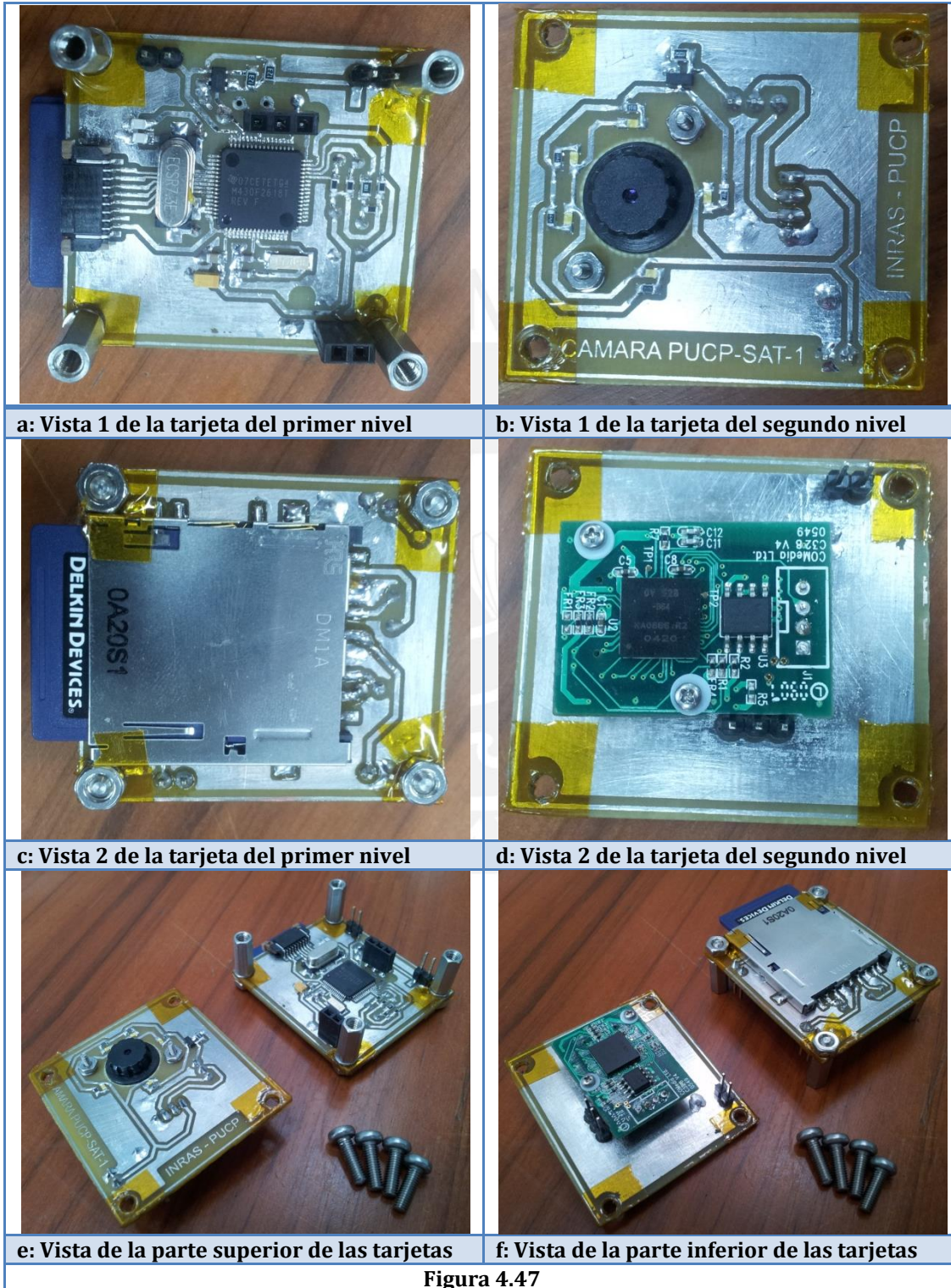


Figura 4.47

Para demostrar que el circuito ocupa un espacio menor al de un octavo del volumen del CubeSat se utilizó un nuevo estándar de satélite denominado PocketQub, mostrado en la *figura 4.48c*, cuyo inventor es el mismo inventor del estándar CubeSat, el profesor Robert Twiggs. El nombre PocketQub fue asignado por el Ph.D Jorge Heraud, director del INRAS-PUCP, amigo cercano del profesor Twiggs.

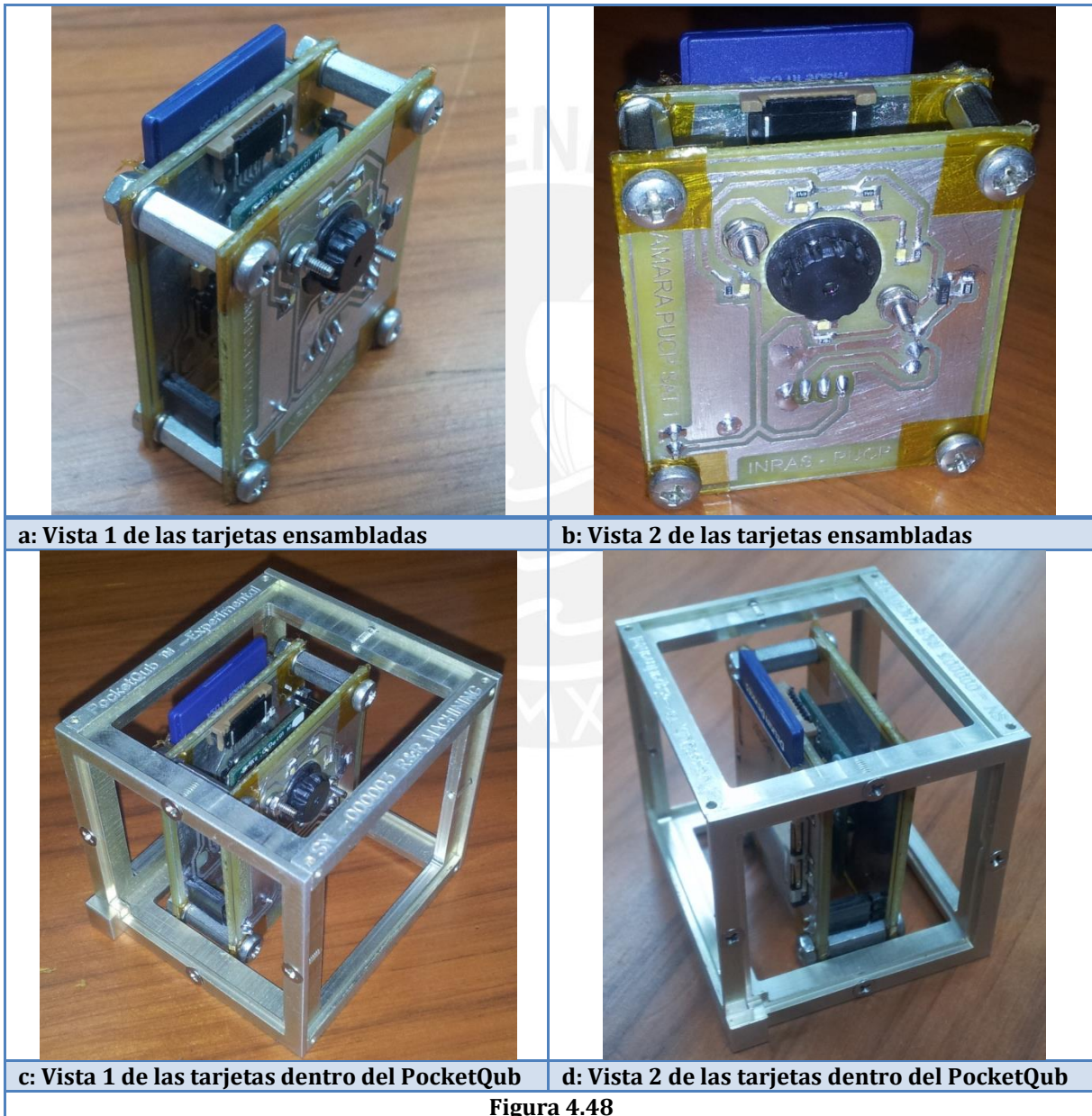


Figura 4.48

CONCLUSIONES

1. Se diseñó e implementó un circuito con un sensor de imágenes convencional para uso en celulares, que permite la captura de distintas imágenes con un volumen menor al de un octavo del volumen de un CubeSat.
2. La utilización de un sensor de temperatura permite brindar un mayor nivel de protección de la cámara ya que sólo funcionará cuando la temperatura esté dentro del rango de operatividad adecuada para el sistema.
3. Se pueden utilizar dos baterías de Ion-Litio de 1500mA a 3.7V en serie para alimentar la electrónica del sistema de adquisición de imágenes, permitiendo su funcionamiento por más de 10 horas continuas.
4. La utilización de un circuito *watchdog* permite que el sistema sea más estable ya que en caso de error por software se reinicia y se recupera automáticamente.
5. El software es estable ya que al enviar a la cámara una orden de adquisición de más de 500 fotos, este se recupera en caso se produzca algún error por retardo de envío de alguna imagen a la tarjeta SD, error al enviar un comando a la cámara, interrupción de la energía, entre otros.
6. Las distintas imágenes capturadas mostraron que capturar un objeto que se encuentra en el “infinito” es posible a partir de un enfoque de 20 cm del objeto de interés y que la interrupción en la adquisición de imágenes no impide su almacenamiento ni visualización.
7. El diseño permite la reducción del hardware y que se pueda colocar en un PocketQub para ser lanzado al espacio.
8. Es más conveniente utilizar tarjetas de memorias SD antiguas para disminuir las probabilidades de pérdida de información debido a los rayos cósmicos.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar un mosfet con control digital en la alimentación de la cámara, para que el microcontrolador habilite el encendido para ahorrar la energía de las baterías en caso no se esté usando la cámara, esto a su vez permitirá su reinicio mediante hardware.
2. Forrar el soporte de la lente con kapton por ser altamente resistente a la radiación; esto permitiría una mayor durabilidad.
3. Reemplazar la lente por una lente de vidrio.
4. Utilizar una cubierta de aluminio en toda la cámara, para tener una protección contra los rayos cósmicos.
5. Utilizar un prisma en forma de “L” para permitir el direccionamiento de la luz hacia la lente de la cámara y evitar que los rayos cósmicos incidan directamente hacia la lente y el sensor.
6. Fijar la tarjeta de forma mecánica al satélite, evitar cualquier tipo de pegamento debido a la posibilidad de desgasificación.
7. Utilizar soldadura de estaño-plata libre de plomo de 0.5 mm de diámetro para poder soldar los distintos empaques de los componentes.
8. Soldar los cables de la cámara directamente a la tarjeta del microcontrolador, no usar ningún tipo de conector intermedio sino cables de teflón.
9. Realizar las pruebas con la cámara ambiental para observar si la electrónica y la lente se deteriorarán en el espacio, ya que cualquier alteración en la lente producirá un mal enfoque o en el peor de los casos, dañaría el sensor de imagen.
10. Una vez montada la cámara al satélite se deben realizar pruebas de vibración para concluir si el ajuste mecánico es lo suficientemente adecuado para que pueda viajar en el cohete.
11. Utilizar la última versión de la librería EFFT-THIN.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Profesor Robert Twiggs, Página Web, [Online],
Disponible: <<http://aa.stanford.edu/aeroastro/Twiggs.html>>
- [2] Universidad Sergio Arboleda, Página Web, Colombia, [Online],
Disponible: <http://www.usergioarboleda.edu.co/proyecto_espacial/index.htm> 16/07/2009
- [3] Libro, Nakamura, J.Francis, T. (ed.) “Image sensors and signal processing for digital still cameras” **2006**
- [4] Libro, Gerald C. Holst, T. S. L. “CMOS/CCD Sensors and Camera Systems” JCD Publishing **2007**
- [5] Artículo informativo, Dave Litwiller, CCD vs CMOS, **2005**
Disponible: <www.dalsa.com/public/corp/CCD_vs_CMOS_Litwiller_2005.pdf>
- [6] IMAGE SENSOR, División de ventas de componentes, Rusia, [Online],
Disponible: <www.prosoft.ru/cms/f/351101.pdf>
- [7] Artículo informativo, Dave Litwiller, Applications Set Imager Choices, **2008**
Disponible: <www.dalsa.com/public/corp/applications_set_imager_choices.pdf>
- [8] Instituto Tecnológico de Tokio, Web Page, “Cute 1.7 APD II, Laboratory for Space Systems, Laboratory for Experimental Astrophysics”. Japan. [Online],
Disponible: <http://lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cute1.7/subsystem_camera_e.html>, 26/04/2009
- [9] AAU CUBESAT, Página Web, Dinamarca, [Online],
Disponible: <<http://www.cubesat.auc.dk/>>

- [10] Y.Tsuda, N.Sako, T.Eishima, T.Ito, Y.Arikawa, N.Miyamura, K.Kanairo, S.Ukawa, S.Ogasawara, S.Ishikawa, S.Nakasuka, "University of Tokyo, CubeSat Project CRITICAL DESIGN REVIEW" 2001. Página Web, Japón, [Online],
Disponible: <http://www.space.t.u-tokyo.ac.jp/cubesat/publication/index-e.html>
- [11] G. J. Wells, L. N. Stras, T. Jeans, R. E. Zee, F. M. Pranajaya, and D. G. Foisy, "Canada's Smallest Satellite: The Canadian Advanced Nanospace eXperiment (CanX-1)," 2002. Página Web, Canada, [Online],
Disponible: <http://www.utias-sfl.net/Main/Docs.html#CanX1Docs>
- [12] DRAGONSAT CUBESAT, Página Web, EE.UU, [Online],
Disponible: <http://mem.drexel.edu/satellite/payload.htm>
- [13] COMPASS-1 CUBESAT "Phase B study", 08/06/2004, Página Web, Alemania, [Online],
Disponible: <http://www.raumfahrt.fh-aachen.de/compass-1/publications.htm>
- [14] Volet 2 : SwissCube, la mission scientifique, Página Web, Suiza, [Online],
Disponible: http://swisscube.epfl.ch/pdf/S3-C-A3_SwissCube_Science.pdf
- [15] Can Kurtuluş, Taşkın Baltacı, Tayfun Aydın, Gökhan İnalhan, Rüstem Aslan, 'Design and Development of the ITUpSAT I Engineering Prototype'. ITUpSAT CUBESAT, Página Web, Turquía [Online],
Disponible: <http://usl.itu.edu.tr/en/publications>
- [16] NEGAI CUBESAT, Página Web, Japón, [Online],
Disponible: <http://kuro.t.soka.ac.jp/cube/mission/index.html>
- [17] COMPASS-1 CUBESAT "Results", Página Web, Alemania, [Online],
Disponible: <http://www.raumfahrt.fh-aachen.de/compass-1/results.htm>
- [18] COMPASS-1 CUBESAT "Phase A study", 06/11/2003, Página Web, Alemania, [Online],
Disponible: <http://www.raumfahrt.fh-aachen.de/compass-1/publications.htm>

- [19] Kashif Gulzar, MASTER'S THESIS "Camera Design, for Pico and Nano Satellite Applicattions", 25/09/2009, Página Web, Suecia, [Online],
Disponible: <epubl.ltu.se/1653-0187/2010/013/LTU-PB-EX-10013-SE.pdf>
- [20] Intelligent Space System Lab, Universidad de Tokyo, Página Web, Japón, [Online],
Disponible: <<http://www.space.t.u-tokyo.ac.jp/ximail/en/viewimg.aspx>>
- [21] Universidad de Leicester, CUBESAT PROJECT PLUME, Página Web, Inglaterra [Online],
Disponible: <<http://cubesat.wikidot.com/sharp>>
- [22] Instituto Tecnológico de Tokio, Cute-1.7 + APD II Project, Página Web, Japón [Online],
Disponible: <http://lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cute1.7/gallery_camera_e.html>
- [23] Universidad del Nuevo Sur de Wales, Página Web, Australia, [Online],
Disponible: <<http://www.bluesat.unsw.edu.au/>>
- [24] Archivo, HCC-Embedded, FileSystems_overview, Página Web. E.E.U.U. [Online],
Disponible: <<http://www.hcc-embedded.com/products/file-sytems/fat-file-systems>> 08/06/13

FUENTE DE LAS FIGURAS

FIGURA 1.1:

http://www.infodefensa.com/wp-content/uploads/TecnobitDentro_20100413.jpg

FIGURA 1.3

<http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/1065528>

FIGURA 1.4

<http://www.meteored.com/ram/UserFiles/Image/octubre07/metop2.jpg>

FIGURA 1.5

<http://www.meteored.com/ram/80/las-bondades-del-satelite-europeo-polar-metop-a/>

FIGURA 1.6

http://www.alipso.com/monografias/2569_satelites/index_archivos/image003.jpg

FIGURA 1.6

http://www.aero.org/publications/crosslink/summer2002/images/01_01.gif

FIGURA 1.7

<http://www.cubesatkit.com/>

FIGURA 1.8

<http://www.gomspace.com/raw/aaucub.jpg>

FIGURA 1.9

http://lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cubesat/news/CUTE-I_FM_0530.jpg

FIGURA 1.10

http://www.dk3wn.info/sat/afu/sat_canx.shtml

FIGURA 1.11

http://space.skyrocket.de/img_sat/uwe-1__1.jpg

FIGURA 1.12

http://polysat.calpoly.edu/images/CP4_AeroCube2.JPG

FIGURA 1.13

http://www.skyrocket.de/space/img_sat/compass-1__1.jpg

FIGURA 1.14

http://www.dk3wn.info/images/swisscube_02.jpg

FIGURA 1.15

<http://www.bildirgec.org/imag/illuzyonistcom/itupsat1-auto1.jpeg>

FIGURA 1.16

<http://www.dk3wn.info/p/wp-content/uploads/2010/03/negai.gif>

FIGURA 2.1

<http://www2.ubu.es/ingelec/tecelec/inaki/Instelec/docsinstrum/Imagenes/DigitalCameraSystem.jpg>

FIGURA 2.17

<http://lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cute1.7/cute1.7-1/images/subsystems/structure/externallmage2.JPG>

http://lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cute1.7/cute1.7-1/gallery/1125_s.jpg

FIGURA 2.18

http://lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cute1.7/images/3d_cad_1.jpg

http://lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cute1.7/gallery/pm/pm_5s.jpg

FIGURA 3.5

http://www.cmucam.org/chrome/site/images/gallery_imgs/components.jpg

FIGURA 3.6

<http://www.seeedstudio.com/depot/images/product/c3281.jpg>

FIGURA 3.8

http://image.itmedia.co.jp/mobile/articles/0603/27/os_vs6624.jpg

FIGURA 3.10

<http://cfnewsads.thomasnet.com/images/medium/570/570973.jpg>

FIGURA 3.11

<http://www.eio.com/images/Product/medium/2595.jpg>

