



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN
DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES PARA
APLICACIONES EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN**

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

Fernando Pujada Gamarra

ASESOR: Donato Andrés Flores Espinoza

Lima, junio del 2009

ÍNDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1: LOS CULTIVOS DE PAPA Y LAS IMÁGENES

1

MULTIESPECTRALES

1.1	Los cultivos de papa en el Perú.	1
1.1.1.	La producción de la papa en el Perú.	1
1.1.2.	Rendimiento de la producción de papa.	2
1.1.3.	Costos de producción.	3
1.2	Centro Internacional de la Papa (CIP).	4
1.2.1	Sistemas de adquisición de imágenes.	4
1.3	Declaración del marco problemático.	7

CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

8

MULTIESPECTRALES EN LOS CULTIVOS

2.1	Estado del arte.	8
2.1.1	Presentación del asunto de estudio.	8
2.1.2	Estado de investigación.	9
2.1.2.1	Imágenes satelitales.	9
2.1.2.2	Cámaras multiespectrales.	10
2.1.2.3	Filtros.	12
2.1.2.4	Tecnología NIRS.	14
2.1.3	Síntesis sobre el asunto de estudio.	14
2.2	Imágenes multiespectrales.	15
2.3	Espectro electromagnético.	15
2.4	Espectro visible.	15
2.5	Espectro del infrarrojo cercano.	15
2.6	Factor NDVI.	15
2.7	Sistema de adquisición de imágenes multiespectrales.	16

CAPÍTULO 3: ALTERNATIVAS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE

18

ADQUISICIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

3.1	Hipótesis de la investigación.	18
3.1.1	Hipótesis principal.	18
3.2	Objetivos de la investigación.	18

3.2.1	Objetivo general.	18
3.2.2	Objetivos específicos.	19
3.3	Sensores CMOS y CCD.	19
3.3.1	CCD.	19
3.3.2	CMOS.	20
3.3.3	Comparación entre los sensores CCD y CMOS.	21
3.4	Esquema general de diseño.	22
3.5	Diseño óptico.	23
3.6	Alternativas de diseño de la adquisición de imágenes.	23
3.6.1	Alternativa 1.	23
3.6.2	Alternativa 2.	26
3.6.3	Alternativa 3.	29
3.6.4	Alternativa 4.	29
3.6.5	Alternativa 5.	39
3.7	Comparación entre alternativas.	42
<u>CAPÍTULO 4: DISEÑO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE</u>		43
<u>IMÁGENES MULTIESPECTRALES</u>		
4.1	Diseño del Sistema de Adquisición de imágenes multiespectrales.	43
4.2	Sensor Kodak KAC-9618.	44
4.3	SRAM CY7C1061.	52
4.4	Módulo DOSonCHIP.	56
4.5	Micro-controlador LPC2106.	57
4.6	Análisis de factores.	59
4.6.1	Análisis de tiempo.	59
4.6.2	Análisis de consumo de corriente.	60
4.6.3	Análisis de costos.	61
4.6.4	Análisis de peso.	62
4.6.5	Análisis de tamaño.	62

CONCLUSIONES**RECOMENDACIONES****FUENTES**

RESUMEN

La papa, originaria de los Andes (Perú y Bolivia), forma parte de la dieta alimenticia mundial gracias al valor nutritivo y energético del almidón. Por ello, la institución del CIP (Centro Internacional de la Papa) realiza diversas investigaciones para su preservación y/o mejoramiento. Una de las herramientas para los estudios de las plantas de papa son las cámaras multispectrales, cámaras que permiten obtener imágenes en el espectro visible y del infrarrojo cercano. Estas imágenes muestran si el tubérculo tiene enfermedad, si les falta agua o nutrientes, entre otros.

Estas cámaras tienen un alto costo en el extranjero lo cual no es accesible para los agricultores peruanos. Además tienen varias limitaciones tecnológicas como poca capacidad de almacenamiento, la lentitud en la toma de imagen, chasis rígido entre otros. Por tales razones el objetivo de la presente tesis es diseñar un sistema de adquisición de imágenes multispectrales sin limitaciones tecnológicas y que proponga un costo menor al de las actuales.

La tesis tiene 4 capítulos donde se encuentra por escrito todo lo realizado en la presente tesis. El primer capítulo tratará sobre el tubérculo de la papa y su situación en el Perú y en el Mundo para luego mencionar como el CIP utiliza la cámara multispectral Dycam. El segundo capítulo abarcará el estado actual de las tecnologías de los diversos sistemas de adquisición de imágenes que existen actualmente, conceptos básicos para ubicarnos en la investigación y el modelo teórico del diseño por desarrollar.

El tercer capítulo planteará la hipótesis principal y por ende se determinará los objetivos, principal y secundarios. En este capítulo se mostrará todas las alternativas de diseño que se han encontrado a lo largo del desarrollo de la tesis. En el cuarto capítulo se detallará el diseño escogido del capítulo anterior, se mostrará además los diagramas de flujo para la programación y los diagramas esquemáticos del diseño del sistema de adquisición de imágenes multispectrales.

Al desarrollar el diseño llegamos a las siguientes conclusiones: el tiempo entre cada imagen se redujo de veinte a seis segundos, el precio no superó de los US\$ 2 000 y el peso no superará los 100 gramos. Por ende el diseño es factible de realizar y obtener imágenes multispectrales fidedignas de los cultivos.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial el Perú ocupa la posición decimosexta en la producción de papa, cultivando en forma tradicional y dependiendo sólo de la experiencia del agricultor; en cambio países líderes en el ranking como los Países Bajos emplea las herramientas de la agricultura de precisión obteniendo grandes cantidades de papa por hectárea [13]. Una de esas herramientas son las imágenes multiespectrales y en el Perú la institución del CIP (Centro Internacional de la Papa) [14] realiza experimentalmente pruebas usando una cámara multiespectral con varias limitaciones tecnológicas como su poca capacidad de almacenamiento, la lentitud de la toma de imagen, su chasis rígido, entre otros. Las pruebas se realizan de manera manual empleando un globo cautivo dirigido por una persona y se hace la toma de la imagen mediante un dispositivo incorporado tardando horas para realizar la prueba. Cabe resaltar que el factor más importante para la adquisición de la cámara es el precio que los agricultores no pueden acceder.

Es así que es importante reducir los costos de producción de la cámara, haciéndolo más accesible al agricultor y optimizar todos los limitaciones tecnológicas que poseen las cámaras actuales utilizadas; logrando información digital en imágenes para el análisis y el manejo posterior de los cultivos.

El presente trabajo de tesis propone el diseño de un sistema de adquisición de imágenes multiespectrales en el espectro visible y del infrarrojo cercano basado en un sensor de imagen, de tecnología CMOS [8], que permite la obtención de imágenes multiespectrales las cuales tienen información necesaria para el manejo posterior de los cultivos y así contribuir a incrementar la producción de papa en el futuro inmediato.

El objetivo es el diseño de un sistema de adquisición de imágenes multiespectrales en el espectro visible y del infrarrojo próximo, basado en un sensor de imagen de tecnología CMOS, para la adquisición de imágenes de cultivos de papa con la finalidad de reducir los costos de la cámara y optimizar las limitaciones tecnológicas.



Dedico esta tesis a mis padres

Isabel e Hilario

A mi madre por

Su dedicación, valentía y esfuerzo por sus hijos

A mi padre por

Sus consejos y preocupación.

CAPÍTULO 1

LOS CULTIVOS DE PAPA Y LAS IMÁGENES MULTIESPECTRALES

El presente capítulo trata sobre la situación actual de los cultivos de papa en el Perú, su producción y el rendimiento de los terrenos; además se hace mención al CIP (Centro Internacional de la Papa), institución que realiza investigaciones con el tubérculo y que actualmente tiene un método para la toma de imágenes de los cultivos de papa y camote. Este método tiene varias deficiencias como las siguientes: su capacidad de almacenamiento, su dependencia del personal que realiza este procedimiento, entre otros.

1.1. Los cultivos de papa en el Perú.

1.1.1. La producción de la papa en el Perú.

La papa es un tubérculo muy importante en la dieta alimenticia mundial gracias al valor nutritivo y energético en el almidón [12], tuvo su origen en los Andes (Perú y Bolivia) y fue introducido a todo el mundo con el descubrimiento de América. En el mundo existen 5000 variedades de papa de las cuales 2300 se encuentran aquí en el Perú.

Es uno de los cultivos más importantes del Perú y contribuye con el 25% del PBI agropecuario y es fuente de trabajo para miles de campesinos. En el ranking mundial de la producción de papa el Perú ocupa la posición decimosexta (1.1%) con un rendimiento de 12.4 toneladas por hectárea (t/ha); además el 85% de la producción nacional se encuentra en la sierra. Ver figura 1.1.

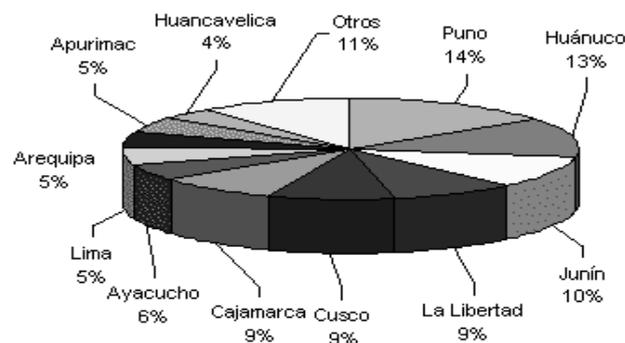


Figura 1.1. Producción de papa por departamentos 2006

Fuente: MINAG – DGIA

1.1.2. Rendimiento de la producción de papa

Uno de los parámetros importantes para las estadísticas de la papa es el rendimiento de cada terreno de cultivo. La página web: “Año Internacional de la PAPA 2008” [18] ha publicado información sobre el rendimiento del cultivo de papa de varios países, como Holanda, Perú, Bolivia, Estados Unidos, Francia y China, 3 de ellos son los países con mayor rendimiento en el mundo. Ver figura 1.2.

Se observa en el gráfico que Estados Unidos es el país con mayor rendimiento con 43.67 t/ha, se resalta también que Holanda ocupa el segundo lugar en el ranking a pesar de ser un país con una superficie territorial pequeña (41 526 km²). China, el primer productor del mundo, tiene un rendimiento pobre; lo que da a entender que gracias a las grandes áreas de cultivos logra obtener toda su producción.

Por último Perú y Bolivia tienen los rendimientos más bajos de 12.46 t/ha y 5.57 t/ha teniendo un superficie territorial parecida y siendo países donde se originó la papa.

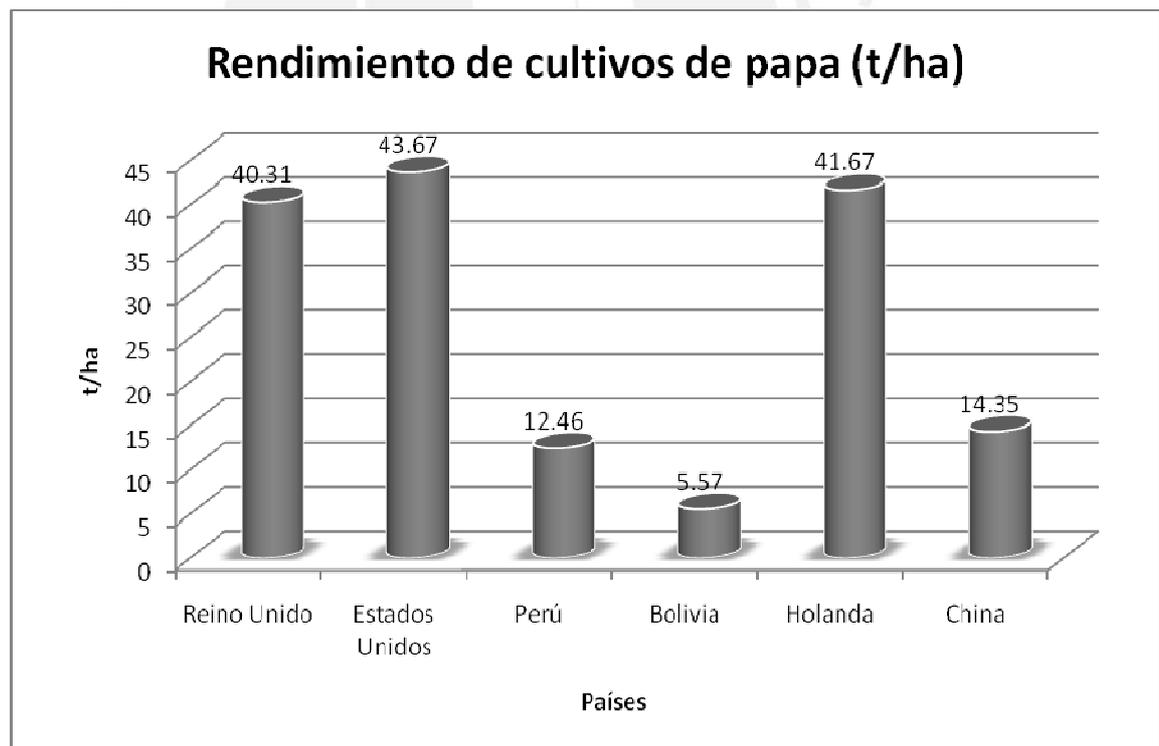


Figura 1.2. Rendimiento de cultivos de papa (t/ha)

Fuente: <http://www.potato2008.org/es/>

1.1.3. Costos de producción.

Se analizará cuanto es el costo de producción para un cultivo de papa. Para la Papa Canchan [12], con un nivel tecnológico medio, realizado en la costa y con una extensión de 1 Ha, se obtiene en la siguiente tabla 1.1 los costos directos e indirectos para obtener un rendimiento de 20 000 kg/ha.:

Tabla 1.1. Costos directos e indirectos del cultivo de papa.

ACTIVIDAD	Total (S./)	Porcentaje (%)
A. COSTOS DIRECTOS	4.794,99	86,96
1. Preparación del terreno	175,00	3,17
2. Siembra	200,00	3,63
3. Labores agrícolas	430,00	7,80
4. Cosecha	725,00	13,15
5. Insumos	2.724,99	49,42
Semillas	1.600,00	29,02
Fertilizantes	734,14	13,31
Pesticidas	390,85	7,09
6. Otros	540,00	9,79
B. COSTOS INDIRECTOS	719,25	13,04
Gastos generales (5%)	239,7495	
Gastos administrativos (10%)	479,499	
TOTAL	5.514,24	100,00

Fuente: MINAG – DGIA

Suponiendo que no se obtenga el rendimiento deseado y se obtenga un rendimiento de 15 000 kg/ha se realiza un análisis de los diferentes precios para obtener una buena rentabilidad. Ver tabla 1.2.

Tabla 1.2. Análisis de precios para la rentabilidad

	S/. X kg	kg	VPP	Costo	Rentabilidad
Menor precio	0,35	15.000	5.250	5.514	-264
Precio normal	0,5	15.000	7.500	5.514	1.986
Buen precio	0,6	15.000	9.000	5.514	3.486

Fuente: MINAG – DGIA

1.2. Centro Internacional de la Papa (CIP).

Es la institución encargada de la conservación científica de la papa, y al mismo tiempo lo hace con otros tubérculos y algunas raíces. Su sede principal mundial se encuentra en el Perú y su labor se inició en 1971 y tiene como objetivos reducir la pobreza, aumentar la sostenibilidad ambiental y ayudar a garantizar la seguridad alimentaria en las zonas más pobres y marginadas. Para lograr estos objetivos realiza diversos trabajos de investigación alrededor de todo el mundo.

1.2.1. Sistemas de adquisición de imágenes.

El CIP realiza sesiones de prueba de fotografías sobre los campos de papa que el centro tiene en sus instalaciones, utilizan una cámara multiespectral de marca “Dycam”. Esta cámara se coloca sobre la base de un globo cautivo, globo aerostático como se muestra en la figura 1.3, asegurándose de su ubicación y protección de la misma. Luego el personal calificado se encarga de volar manualmente el globo con la cámara incorporada, teniendo que caminar por todo el cultivo; una vez en el aire se ubica en forma manual también la zona del cultivo para la toma de imagen correspondiente mediante la ayuda de un dispositivo especial implementada en la cámara; esto conlleva a que un equivocado manejo del dispositivo desestabilice la cámara al momento de la toma de imagen.

La cámara Dycam utilizada tiene una capacidad de almacenamiento para 30 imágenes; es por ello que contando manualmente se verifica si se encuentra completa la memoria; si aún no se llena se ubica otra zona y se repite la toma de fotografía. Una vez que se completa la memoria se desciende el globo en forma manual, luego se retira la cámara del globo y se descargan las fotos en una computadora. Si aún no se ha realizado la toma de fotografías de todo el cultivo se vuelve a realizar el mismo procedimiento hasta completar todas las zonas haciendo al proceso discontinuo.

En la figura 1.3 se muestra una representación gráfica del procedimiento actual que emplea el CIP. Y en la figura 1.4 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento sobre la toma de imágenes recalcando en cuadros los problemas actuales.

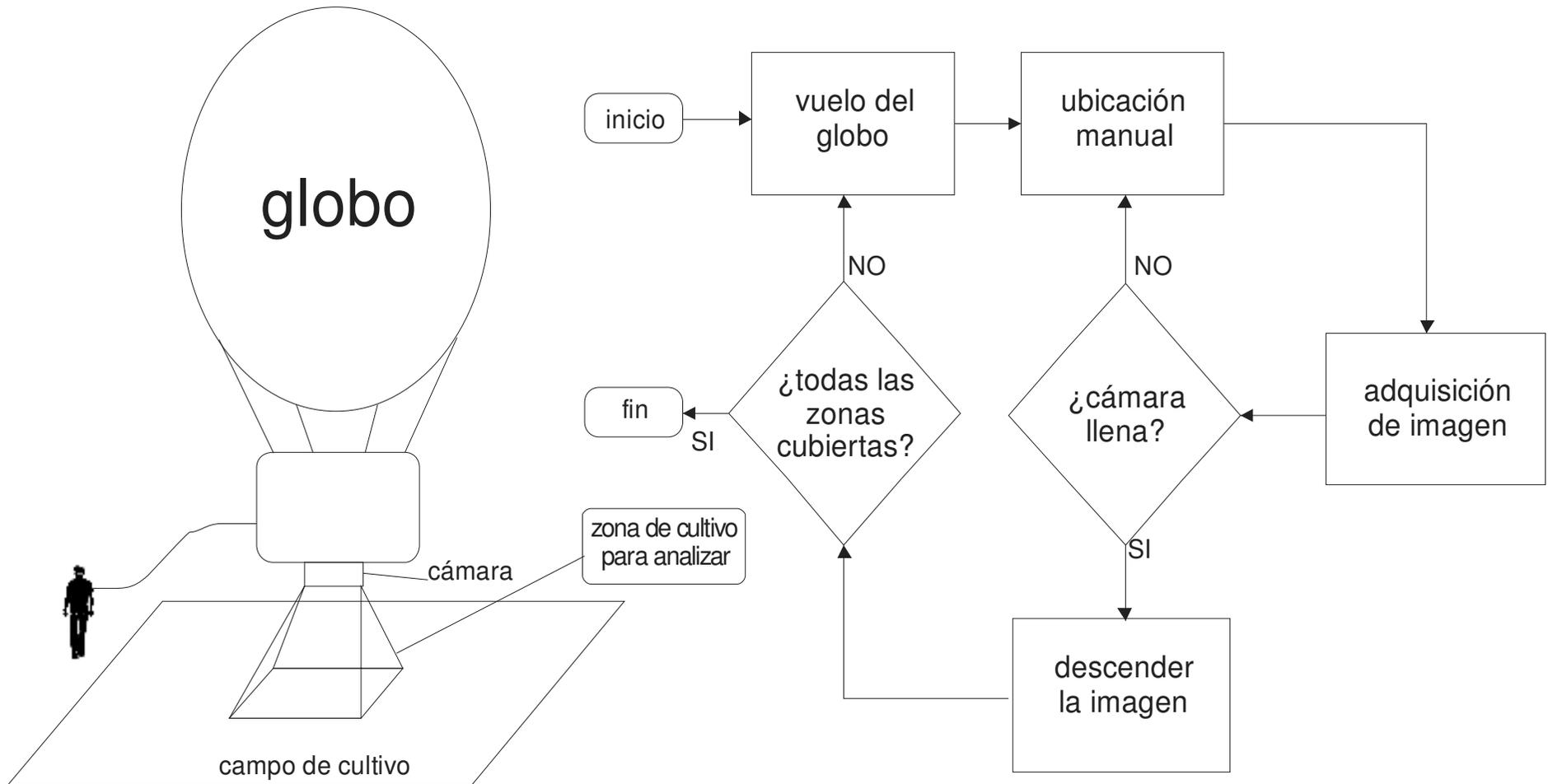


Fig 1.3 Representación gráfica del procedimiento actual de la toma de imágenes que emplea el CIP

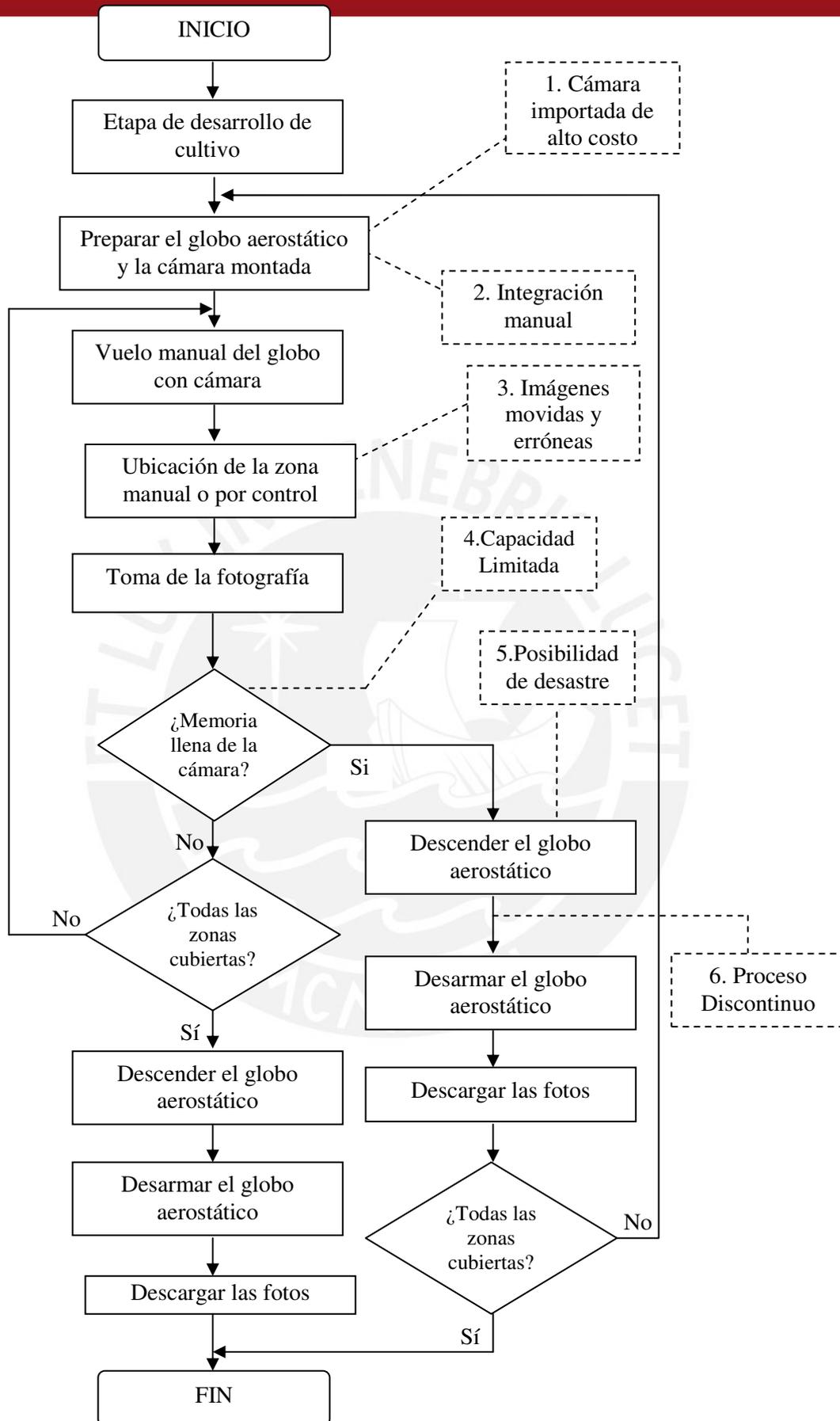


Figura 1.4 Diagrama de flujo de la sesión de toma de imágenes

1.3. Declaración del marco problemático.

El sistema actual de adquisición de imágenes multispectrales que emplea el CIP, se basa en una cámara multispectral importada y colocada sobre la base de un globo cautivo. La cámara multispectral posee limitación tecnológica, capacidad de almacenamiento, comunicación con computadora mediante un cable, chasis rígido que no es adecuada para el montaje sobre el globo. Además la toma de imagen es un proceso discontinuo por la limitada capacidad de almacenamiento, alrededor de 30 imágenes, y depender de la variabilidad de la injerencia humana en cada toma de imagen; produciendo a veces imágenes movidas o erróneas. La realización de cada toma de imagen tiene un alto riesgo por factores externos o mal manejo del personal.



CAPÍTULO 2

SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES EN LOS CULTIVOS

El presente capítulo trata sobre el estado de investigación de los diversos sistemas de adquisición de imágenes que existen en el mundo, algunos conceptos básicos y el modelo teórico del sistema de adquisición de imágenes multiespectrales.

2.1. Estado del arte.

2.1.1. Presentación del asunto de estudio

La papa, tubérculo oriundo del Altiplano andino, es un alimento que colabora con el fortalecimiento de la dieta alimenticia de la humanidad [12]. El Perú ocupa la posición decimosexta de la producción mundial a pesar de ser uno de los países que vio nacer este tubérculo. La Institución del CIP (Centro Internacional de la Papa) [13] se ha encargado de velar por la conservación de la papa y en los últimos años realiza experimentalmente pruebas empleando una de las herramientas de la agricultura de precisión como son el uso de imágenes multiespectrales. Estas imágenes proporcionan información útil para el agricultor con el fin de que realice un manejo posterior eficiente en el cultivo; esta información es brindada en el espectro visible y del infrarrojo cercano. Esta herramienta aún no se ha difundido en los agricultores de nuestro país; por lo cual la siembra de la papa es en forma tradicional basándose en la experiencia del campesino.

Las cámaras multiespectrales empleadas para la obtención de imágenes multiespectrales utilizan sensores de imágenes multiespectrales con ciertas características. Una de la característica relevante es la capacidad del sensor de captar las longitudes de onda del espectro visible y del infrarrojo cercano que son reflejadas por las plantas. Estas cámaras se diferencian de las convencionales por su aplicación y por el rango del espectro que cubren con sus sensores. Cámaras comercializadas por marcas como Sony y Nikon, son adaptadas con dispositivos adicionales (filtros) para lograr imágenes en el espectro visible (cámaras convencionales comerciales).

Existen diversos estudios que emplean cámaras comerciales para obtener imágenes multiespectrales en el rango de onda deseado. Adicionalmente hoy en día los fabricantes producen cámaras con una mayor resolución espectral, puertos de comunicación con la computadora, como el serial, RS232, gran capacidad de almacenamiento y menor peso posible

Con respecto a los sensores existen dos tecnologías difundidas CCD y CMOS [11], las cuales se emplean en forma de arreglo y lineal según la aplicación que se le dé; para la agricultura de precisión se emplea el sensor CCD en forma de arreglo por la calidad de imagen y la mayor área de cobertura que brinda.

Por lo tanto es de muy alta importancia desarrollar un diseño de cámara multiespectral en el espectro visible y del infrarrojo cercano que proponga un costo menor a los costos internacionales y sean del alcance de cualquier agricultor, con el objetivo de tener imágenes fidedignas que brinden la información correcta y necesaria para armar una eficiente estrategia de cultivo mejorando la producción de la papa y así las condiciones de vida de los agricultores.

2.1.2. Estado de investigación

2.1.2.1. Imágenes Satélites

Hoy en día, hay dos fuentes principales de datos de percepción remota satelitales disponibles: LANDSAT y SPOT [10] [9].

LANDSAT: primer satélite lanzado por los Estados Unidos para el monitoreo de recursos terrestres llamado inicialmente ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) Luego este satélite junto con 5 más recibieron el nombre LANDSAT (Land Satellite). Los datos de percepción remota producidos por el sistema LANDSAT provienen de dos tipos de sensores: Scanner Multiespectral (MSS) y un Mapeador Temático (TM).

SPOT: la otra fuente principal de percepción remota satelital, SPOT (System Pour l'Observation de la Terre) es operado por los franceses y ofrece imágenes con una resolución espacial entre 33 y 66 pies (10 a 20 m). Las imágenes SPOT están disponibles por SPOT Image Corporation, Reston, VA.

Actualmente la mayoría de los usuarios de los datos de percepción remota satelital son grandes corporaciones o agencias gubernamentales interesados en recoger datos

de áreas muy grandes. Un ejemplo es el Servicio Nacional de Estadística Agropecuaria (NASS) [10] del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) que usa las imágenes multiespectrales para comprobar los cambios en los cultivos y para ajustar la intensidad de muestreo del suelo para cultivos específicos. Los datos de la percepción remota pueden ser comprobados en el campo, identificar los tipos de cultivos y estimar el nivel de producción de los cultivos en cada estado.

Existe otro satélite que emplea dos países en conjunto, el Satélite CBERS-2 (China-Brazil Earth Resources Satellite) [3], que también tiene 3 tipos de sistemas de sensores para la captura de imágenes: el CCD (Charge-Coupled Device), sensor IR-MSS (InfraRed Multispectral Scanner Subsystem) y WFI (Wide Field Imager); es así que Carrasco [3] en su trabajo de investigación sobre aplicaciones agrícolas y forestales empleando este satélite pudo hacer una combinación de las bandas 3 y 4 del sensor CCD con la banda 2 del IR-MSS para que el sensor CCD sea más eficiente en espectro infrarrojo medio puesto que el sensor CCD está ubicado en el espectro visible y en el infrarrojo cercano. Y el IR-MSS opera en 4 bandas espectrales desde el visible hasta el térmico.

El CIP [14] también realiza estudios utilizando las imágenes satelitales, uno de ellos es empleando estas imágenes y su alta resolución para obtener mejoras en las estadísticas de camote cultivados en Uganda. Para ello utilizaron dos imágenes; una multiespectral y la otra pancromática¹; ambas tomadas por el satélite SPOT en los meses de mayo y octubre del 2006. Las imágenes tienen resolución de 10 m. y 5 m. De las imágenes se obtuvo varios gráficos, uno de ellos analiza la reflectancia del cultivo de camote concluyendo que en el espectro visible la reflectancia es pequeña y en el espectro del infrarrojo cercano es muy alta.

2.1.2.2. Cámaras multiespectrales

Las cámaras digitales [8] utilizan dos tecnologías de sensor de imagen, CCD (Charge Couple Device) o CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) [4]. Uno de los fabricantes, Hamamatsu [21], muestra varias aplicaciones utilizando los sensores de tecnología CCD, en forma de arreglo, lineal, de fotodiodo, etc, y son las siguientes: la medición científica, aplicaciones generales de Rayos X, para radiología, para difracción y para espectrofotometría. De igual manera el fabricante ofrece para las mismas aplicaciones en la tecnología CMOS [11].

1. adj. *Fotogr.* Dicho de una placa o de una película: Cuya sensibilidad es aproximadamente igual para los diversos colores.

Además fabricantes como Sony, Kodak o Nikon desarrollan y comercializan cámaras multispectrales en varios de los espectros como el infrarrojo, ultravioleta, entre otros. Cada sensor tiene sus propias características; como el rango dinámico, uniformidad, velocidad, entre otras y de acuerdo a la aplicación y la región del espectro a analizar.

En el trabajo de investigación de John Pickle [1], David Bradley [2] sobre estudios sobre cámaras en el espectro visible e infrarrojo para aplicaciones en cultivo muestran que el sensor más utilizado es el sensor CCD en el modo de Arreglo, pues tiene un mayor alcance en su área de cobertura que en el modo lineal.

Otro aspecto importante en el diseño de las cámaras es el factor NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) que ayuda a tener un patrón de referencia para obtener buenos resultados. [2] Bradley emplea este factor para poder hacer una cámara que produzca esas imágenes en el infrarrojo cercano empleando una cámara digital Sony "NightShot". El autor indica que usó una cámara para el espectro visible y otro para el infrarrojo cercano. Esto lo logró removiendo el filtro NIR-cut de la cámara; luego los integró en un solo hardware separándolo mediante una luna en forma oblicua a las cámaras que están en "L"; para así separar las ondas del espectro visible y del infrarrojo cercano.

De igual manera John Pickle [1] emplea dos cámaras digitales de color Sony FCB-EX 480 para hacer una cámara multispectral con el espectro visible y el infrarrojo teniendo como referencia el factor NDVI. Realizó varias pruebas con una sola imagen, los comparó en cada banda del espectro visible (Rojo, Verde y Azul) y luego combinó el espectro del infrarrojo cercano con cada banda del espectro visible (Infrarrojo cercano – Rojo – Verde, Infrarrojo – Rojo).

Actualmente existen diversos sistemas de adquisición de imágenes; una de ellas es la utilización de avionetas donde las fotografías se realizan en movimiento y emplean una cámara con múltiples tipos de sensores, este es el caso de The Nebraska Airbone Remote Sensing Facility [6] que en el año 2001 realizó pruebas sobre una avioneta implementando un sistema para la adquisición de imágenes. La avioneta volaba a 218 Kmph y tiene un rango máximo de 1300 m. Dentro se implementaron los sensores hiperespectrales y multispectrales que conjuntamente con los sistemas GPS (Global Posicion System), un dispositivo de análisis espectral y AISA que es un procesador de imagen hiperespectral. Este procesador tiene un rango espectral de 430 – 900 nm, un

ancho de banda espectral de 1.63 a 9.80 nm y programable hasta 286 canales; lo cual significa que el rango lo puede dividir en esa cantidad y puede captar más longitudes de ondas.

AISA está basada en archivos ASCII y además tiene un sistema DGPS para tener una mejor precisión en la imagen. El sistema funciona en 3 modos: A, B y C.

Modo A: Su funcionalidad es con el espectro total, emplea tecnología CCD y tiene un tiempo de integración de 150 ms.

Modo B: Tienen configuración espacial para el número de canales espectrales los cuales son reducidos. Además uno puede elegir el tiempo de integración, el número de canales espectrales y las ondas de los canales.

Modo C: Tiene configuración espectro total y espacio parcial; además todos los 286 canales son de gran resolución espacial y el tiempo mínimo de integración es 55 ms.

El principio del diseño óptico del AISA se basa en dos prismas, la cual una vez captada la onda se divide en tres ondas: la larga, la corta y la central y llega a una matriz detector. Además posee un software pre-procesador la cual provee una corrección geométrica automática, rectificación, mosaico, cálculo de la radiación, etc.

2.1.2.3. Filtros

Existen trabajos de investigación del Instituto de Tecnología de Rochester [16], New York, sobre el diseño de filtros para cámaras multispectrales y en las cuales hicieron un sistema de imagen utilizando una cámara CCD monocroma, cámara Roper Scientific Photometrics Quantix, construyendo un sistema con seis filtros en distintas posiciones, además se empleó un lente de 50 mm marca Nikon y Unaxis Balzers que reduce la banda del infrarrojo cercano, ambas se instalaron sobre el sistema de filtros y se obtuvieron la gráfica de la sensibilidad estándar del sistema de imagen implementado. Luego se implementó un sistema de 33 filtros de vidrio en el diseño del filtro para obtener una alta calidad del rendimiento colorimétrico, estos filtros tenían una banda de 3 mm. variables de 2 a 1 mm. Con estos sistemas implementados se obtuvo tablas de rendimiento sobre el filtro seleccionado y gráficas con las curvas estimada y medida observando una gran similitud.

Otros trabajos de investigación como el de Jon Yngve [15] muestran el estudio de las imágenes multispectrales y la simulación ante cambios en la iluminación, utilizando una cámara con sensor CCD. Se desarrolla el modelo matemático de la respuesta de

la cámara ante la sensibilidad espectral del sensor, la transmitancia espectral del filtro óptico y del lente, la reflectancia espectral del objeto y la radiación de la iluminación. Además utilizaron D65 como fuente iluminadora, una cámara espectral CCD Eikonix, Schott filtros y un gráfico con 64 pigmentos para realizar una evaluación del sistema y eligiendo una reconstrucción de errores espectrales de valor eficaz máximo obtuvieron diversos valores en la variación del número de filtros.

Por último se realizó la simulación de la iluminación usando dos métodos:

- 1) Método clásico basado en el espacio CIELAB (CIE L^*a^*b , Comisión Internacional de Iluminación, L =iluminación, a =posición entre magenta y verde, b = posición entre amarillo y azul.) y
- 2) Método aplicando técnicas de imágenes multispectrales. De los dos métodos se concluyó que el segundo es de buena calidad incluso para luminarias que son difíciles de tratar con métodos convencionales.

Otra característica importante de los filtros es el de su sintonización y su gran importancia de estos en la agricultura, medicina, arqueología y en la visión nocturna; así lo muestra en el documento de la Sociedad Internacional de Ingeniería Óptica sobre los filtros sintonizables electrónicos [17]. Este documento muestra un estudio preliminar y la importancia de la sintonización de los filtros para la aplicación deseada y su gran utilidad; además muestra en primer lugar sus atributos, entre las cuales destaca el bajo consumo de potencia, el pasa-banda selectivo, insensibilidad al ambiente. Existen tres tipos de filtros: de cristal líquido, acústico-óptico y un interferómetro.

El filtro de cristal líquido tiene un tiempo de respuesta de 50 ms. y una resolución espectral en nm. El acústico-óptico utiliza un cristal donde las frecuencias de radio son usadas para separa la onda deseada de la banda de frecuencias. Los interferómetros son más apropiados para detección de gas. Además en el documento se realiza un análisis ideal y real de la luminosidad involucrando las siguientes variables: el espectro de la luminosidad, la transmisión de la óptica, la reflectividad del píxel de escena, el ancho de banda del filtro, entre otros [17]. En el análisis real se toma en cuenta además la contribución de las ondas fuera de la banda de transmisión. Finalmente hace una comparación con el sistema de filtro mecánico [16] pues estos tienen limitación en el color y es menos confiable que estos filtros sintonizables electrónicos.

2.1.2.4. Tecnología NIRS

En el marco actual la calidad de los alimentos es fundamental y es una exigencia de los mercados internos y externos; una tecnología barata y no contaminante es NIRS (Near Infrared Spectroscopy) [7]. En América Latina varios países lo están adoptando y uno de ellos es Argentina, que en su sector privado existen estos equipos en las industrias de alimento balanceado, avícola, azucarera, frigorífico, agroquímica y maltera [7]. También se emplean en los laboratorios de agro análisis, en las cámaras arbitrales de cereales, en acopios de granos, y en semilleros.

Dentro del campo de la producción agroindustrial son dos los tipos de análisis:

Análisis cuantitativo: el objetivo es la estimación del contenido relativo.

Análisis cualitativo: el objetivo es determinar si una muestra desconocida pertenece o no a un grupo de determinadas características.

2.1.3. Síntesis sobre el asunto de estudio

Luego de investigar varios temas referente a los sistemas de adquisición de imágenes se resume lo siguiente:

- Cada uno de los satélites puestos en órbitas, cuentan con sensores multiespectrales en cada banda del espectro electromagnético; los principales son el LANDSAT y el SPOT. Las imágenes tomadas cubren grandes áreas terrenos y es usado por instituciones como NASS, USDA, FAS.
- Las cámaras multiespectrales aplicadas a la agricultura utilizan sensores CCD en forma de arreglo ya que se adecua a los requerimientos.
- Un factor importante para el análisis de los cultivos es el factor NDVI.
- El Nebraska Airbone Remote Sensing Facility implementó sobre una avioneta un conjunto de cámaras multiespectrales y combinándola en un sistema AISA obtuvo imágenes multiespectrales con resolución espacial y espectral.
- Empleando el espectro NIR se ha logrado una nueva tecnología la cual mediante un análisis cuantitativo y cualitativo en los cultivos agrícolas se obtienen parámetros para el manejo posterior.
- El CIP realizó en los cultivos de Uganda empleando imágenes satelitales las cuales analizaron el comportamiento de la reflectancia en los cultivos de camote.
- Diversos estudios han demostrado que la utilización de sistemas de filtros en varios espectros hacen de la cámara un aparato completo y adecuado para la aplicación deseada.

2.2. Imágenes multiespectrales

Es una colección de varias imágenes monocromas de la misma escena, cada uno de ellos tomadas con un sensor diferente. Cada imagen es referida como banda. [9] [10]

2.3. Espectro electromagnético

Una gama de radiación electromagnética, ordenada de acuerdo a la longitud de onda de los rayos gama. Este es el caso cuando la luz dispersa por un prisma muestra los colores que la componen, con frecuencia los espectros parecen rayados con líneas de absorción o emisión que pueden ser examinadas para revelar la composición y movimiento de la fuente de luz. [9] [10]

2.4. Espectro visible

Se denomina a la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. A la radiación electromagnética en este rango de longitudes de onda se le llama luz visible o simplemente luz. No hay límites exactos en el espectro visible; un típico ojo humano responderá a longitudes de onda desde 400 a 700 nm. [9] [10]

2.5. Espectro del infrarrojo cercano

Esa parte del espectro visible al ojo humano se extiende de alrededor de 400nm a 800nm, mientras que el espectro infrarrojo se extiende de aproximadamente 2,500nm a 25,000nm. El infrarrojo cercano es considerado esa parte del espectro situada entre la región visible y la región infrarroja. El rango de longitudes de onda que el NIR cubre, está entre 750nm á 2,600nm. [9] [10]

2.6. Factor NDVI

De las siglas en inglés, Normalized Difference Vegetation Index, es una fórmula que cuantifica la densidad del crecimiento de la planta utilizando la radiación del infrarrojo cercano y visible. [1] [9] La fórmula es la siguiente:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Las variables RED y NIR están definidas por las medidas de reflexión espectral adquiridas en las regiones del rojo e infrarrojo cercano, respectivamente. El factor NDVI varía entre -1,0 y +1,0 y está directamente relacionado con la capacidad fotosintética y, por tanto, con la absorción de energía por la cobertura arbórea.

2.7. Sistema de adquisición de imágenes multiespectrales

La energía electromagnética del sol se emplea para el análisis en los cultivos, mediante la reflectancia que ocurre en cada objeto; es decir la luz del sol incide en el objeto y un gran porcentaje de esta energía rebota; esto ayudará a determinar mediante colores el estado del objeto en estudio. En los cultivos se emplea la percepción remota y esto mide la energía reflejada y emitida de los objetos. Es decir que una planta es de color verde porque la clorofila en las hojas absorbe la mayor parte de la energía de las longitudes de onda del azul y el rojo; y refleja principalmente las longitudes de onda verde y este color es el que percibe el ojo humano.

Basándose en este principio físico, la agricultura de precisión ha desarrollado varias herramientas entre las cuales destaca la tecnología NIRS y las imágenes multiespectrales. Para asegurar el aumento de la productividad y la buena calidad del producto se requiere de un sistema de adquisición de imágenes multiespectrales que permita obtener la información útil y suficiente para el manejo posterior de los cultivos.

La cámara multiespectral contará con un sistema óptico, un circuito de adquisición de imágenes y un circuito de tratamiento de la imagen. En el sistema óptico se captará la las longitudes de onda del espectro visible y del infrarrojo cercano a través de unos lentes. Una vez obtenida la energía pasa al circuito de adquisición de imágenes que se encuentra dividido en 4 etapas, todas en forma secuencial, la primera etapa consiste en el acondicionamiento del sensor y la obtención de las imágenes en forma digital; luego prosigue la etapa de la matriz de puntos la cual se encargará de poner la información digital en un arreglo; para esta etapa es necesaria el desarrollo en paralelo de la etapa de lógica; por último la etapa 4 es la de comunicación hacia una memoria de almacenamiento preventivo y hacia un circuito de transmisión de la imagen digital obtenida.

Esta información obtenida será analizada cuantificando la densidad del crecimiento de la planta mediante un factor NDVI, mediante los colores: azul, rojo y verde y de acuerdo a eso se determina si les falta riego, abono, pesticidas. En el diagnostico de cultivos agrícolas, se determina un espectro característico para distintos cultivos y en cada etapa de crecimiento saludable. Plantas en crecimiento saludable reflejan más luz verde que plantas enfermas marrones o amarillas. En otras palabras, plantas enfermas producen distintas respuestas espectrales o patrones característicos de radiación reflejada.

Aeronave con sistema de adquisición de imágenes multispectrales implementada

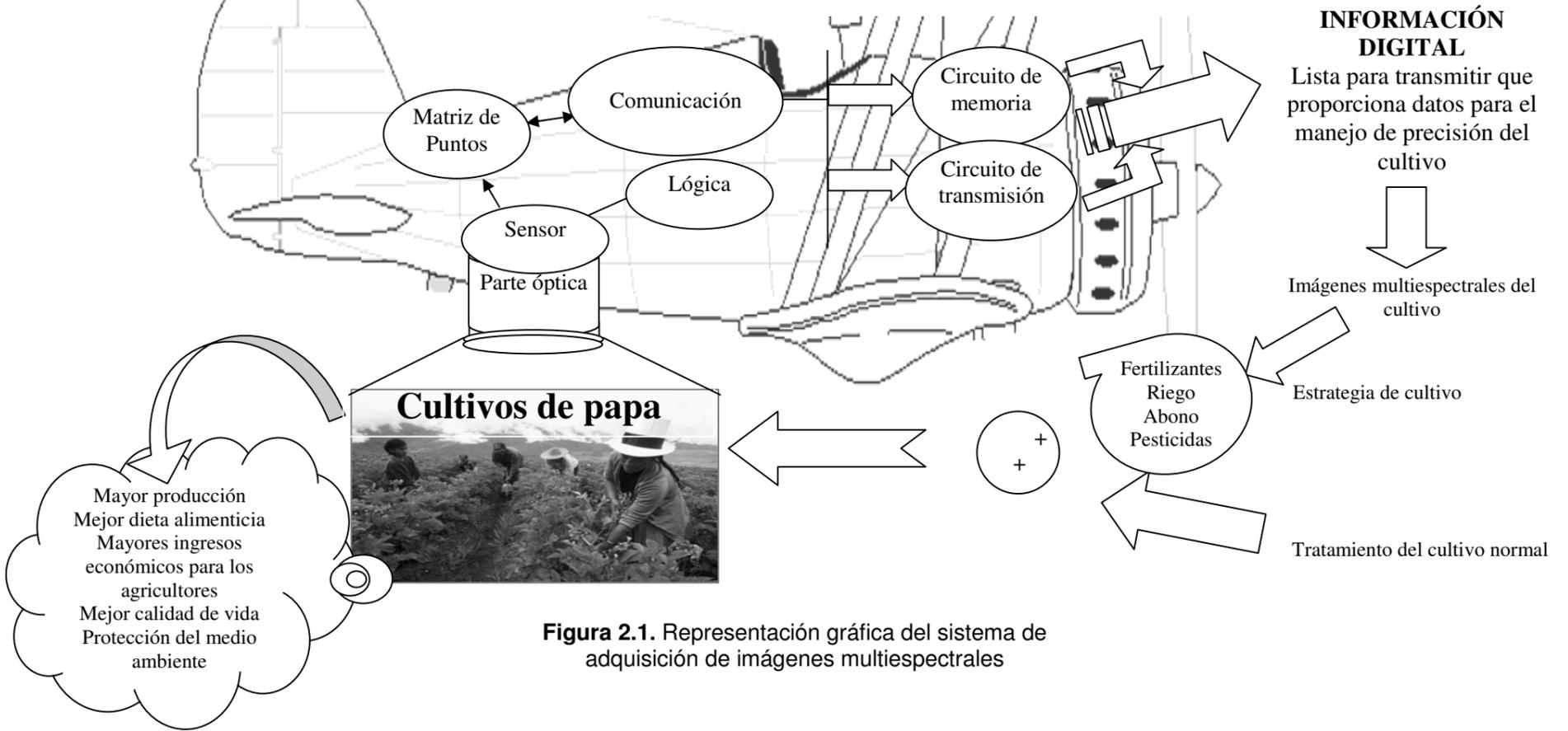


Figura 2.1. Representación gráfica del sistema de adquisición de imágenes multispectrales

CAPÍTULO 3

ALTERNATIVAS DE DISEÑO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

MULTIESPECTRALES PARA LOS CULTIVOS DE PAPA

En el presente capítulo se plantea la hipótesis principal, de la cual se determinará el objetivo principal y los objetivos secundarios. Además se mostrarán las alternativas de diseño de sistemas de adquisición de imágenes mostrando sus respectivos diagramas de bloques, explicando su funcionamiento, los componentes seleccionados para cada diseño.

3.1. Hipótesis de la investigación.

3.1.1. Hipótesis principal.

Dada la limitación tecnológica que posee la cámara multiespectral, empleada por el CIP, como la poca capacidad de almacenamiento, la comunicación, entre otros, la dependencia de la variabilidad de la injerencia humana, ser un proceso discontinuo, tener un alto riesgo por factores externos o del personal y el elevado precio, hacen que el sistema sea una herramienta poco eficiente para el uso en la agricultura. Entonces el diseño de un sistema de adquisición de imágenes multiespectrales en el espectro visible y del infrarrojo cercano basado en un sensor de imagen con un rango en el espectro de los 400 hasta los 1100 nm. acondicionado en un hardware adecuado permite obtener la reflectancia de las plantas y así poder obtener información sobre su estado actual lo cual permitirá la adquisición de datos cuya interpretación proporcionará el uso adecuado de los insumos: fertilizantes, agua, abono, pesticidas, entre otras; para mejorar la producción y proteger el medio ambiente.

3.2. Objetivos de la investigación.

3.2.1. Objetivo general.

Diseñar un sistema de adquisición de imágenes multiespectrales en el espectro visible y en el infrarrojo cercano, basado en un sensor de imagen con rango en el espectro de los 400 hasta los 1100 nm., para la toma de imágenes multiespectrales en el espectro visible y del infrarrojo cercano de los cultivos de papa.

3.2.2. Objetivos específicos.

- 1) Diseñar el sistema de adquisición de imágenes multispectrales sin limitaciones tecnológicas que la presente cámara posee.
- 2) Proponer todos los diseños alternativos que ayuden a solucionar las limitaciones tecnológicas de las cámaras actuales.
- 3) Reducir el costo actual de la cámara multispectral para que sea accesible a todos los agricultores.
- 4) Reducir el tiempo de la adquisición de la imagen multispectral.
- 5) Diseñar el sistema de almacenamiento de las imágenes adquiridas.

3.3. Sensores CMOS y CCD

3.3.1. CCD

CCD, de las siglas en inglés Charge-Coupled Device[4][5] que traducida al español es “dispositivo de cargas acopladas”, es un dispositivo electrónico capaz de transformar un patrón de iluminación en un patrón de cargas eléctricas dentro de un grupo de condensadores entrelazados.

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques del funcionamiento básico del sensor CCD. Luego que la intensidad de luz se almacenan en formas de cargas eléctricas, se procede a digitalizarlo, por lo cual observando la figura los electrones pasan de una celda a otra hasta llegar a un dispositivo que convierte esa carga eléctrica en voltaje, luego se amplifica para no perder la información. Por último se transmite al dispositivo que almacena toda el área del CCD. El sensor necesita de un circuito oscilador para su funcionamiento.

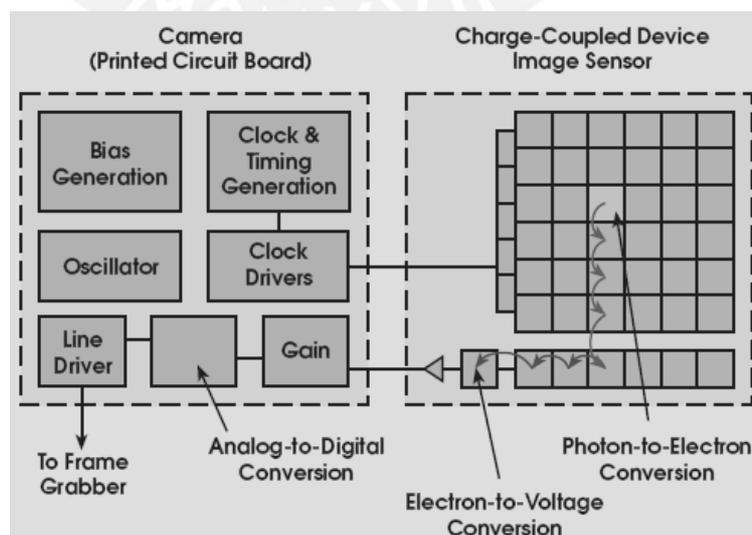


Figura 3.1. Diagrama de bloques básico del CCD

Fuente: Revista PHOTONICSS SPECTRA ©Laurin Publishing Co. Inc.

3.3.2. CMOS

CMOS, de las siglas en inglés Complementary Metal-Oxide Semiconductor[4][5] que traducida al español es “semiconductor complementario de óxido metálico”, en realidad este nombre es con el que se conoce, su nombre verdadero es APS, siglas en inglés Active Pixel Sensor, el cual utiliza la tecnología antes mencionada. Esta clase de sensor fue mencionado desde 1968 por Peter J.W. Noble pero fue definido por Eric Fossum en 1993.

En la figura 3.2 se muestra al sensor con el arreglo de pequeños sensores, píxeles, con sus respectivos dispositivos para la conversión de carga a voltaje, el circuito que tiene el reloj y el dispositivo para convertir la señal analógica a digital. El sensor trabaja de la misma manera que el sensor CCD con la única diferencia que la conversión se realiza en cada pixel, donde se realiza también la conversión de la intensidad de luz en carga eléctrica. Y a la salida del sensor se obtendrá la imagen en forma digital. Algunos CMOS entregan la información de la imagen en forma paralela y otros en forma serial.

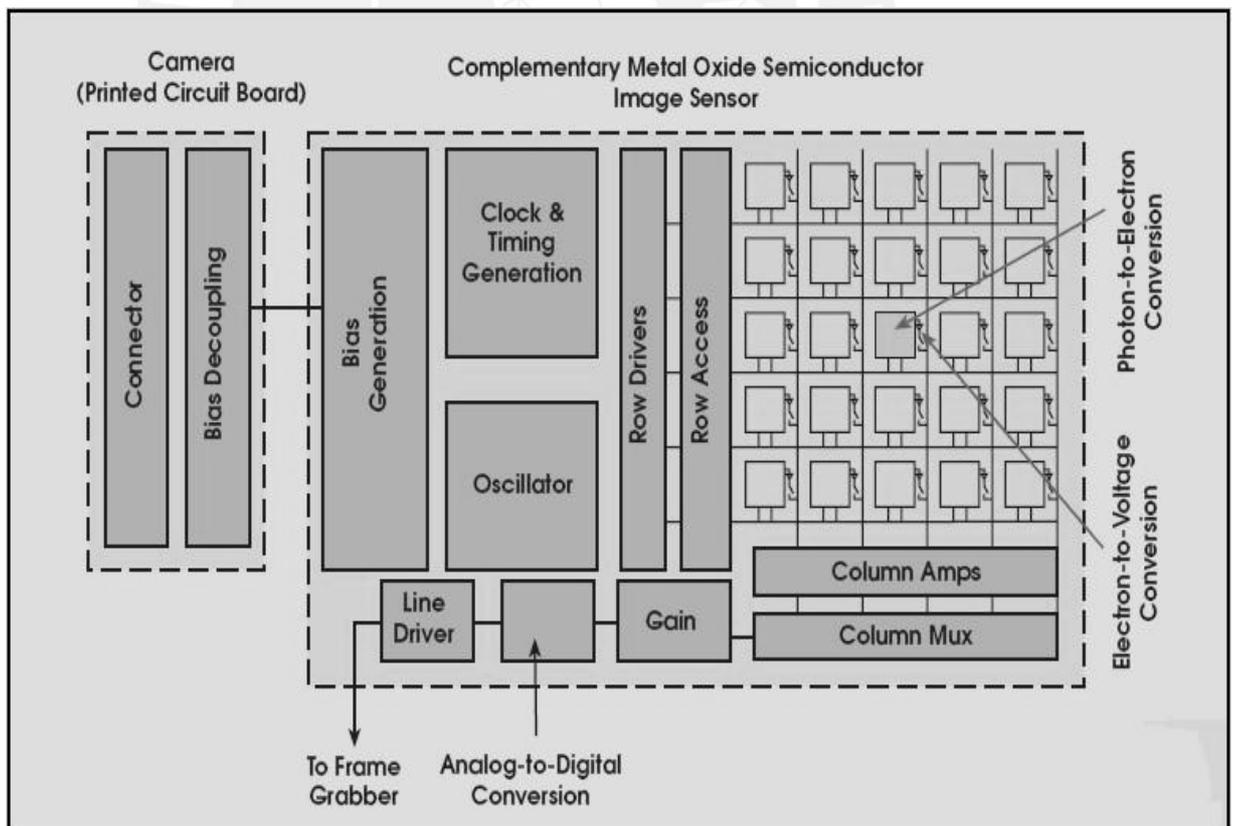


Figura 3.2. Diagrama de bloques básico del CMOS

Fuente: Revista PHOTONICSS SPECTRA ©Laurin Publishing Co. Inc.

3.3.3. Comparación entre los sensores CCD y CMOS

En los últimos años se ha discutido cuál de los dos sensores es el mejor para generar imágenes, pero cada sensor se utiliza de acuerdo a los requerimientos y aplicaciones que uno desea realizar [11].

En la tabla 3.1 se muestra un cuadro comparativo entre los dos sensores, basándose en las características y el desempeño que las dos tecnologías ofrecen. En esta tabla se resume la investigación realizada [4] [5] por un fabricante, DALSA, que detalla con bastante precisión cada característica y rendimiento del sensor.

En el primer cuadro se encuentran las características del sensor y de un módulo o cámara que se basa en el sensor. En el siguiente cuadro está el rendimiento de un sistema, como la cámara, basado en el sensor de imagen. De acuerdo a la tabla se elige el sensor CMOS pues consume menos corriente y nos brinda información digital para así procesar la imagen de una manera más rápida y sencilla.

Tabla 3.1. Comparación entre los sensores CCD y CMOS

Características	CCD	CMOS
Señal de salida del pixel	Paquete de electrones	Voltaje
Señal de salida del chip	Voltaje (analógico)	Bits (digital)
Señal salida de la cámara	Bits (digital)	Bits (digital)
Factor de llenado	Alta	Moderado
Sistema de ruido	Bajo	Moderado
Complejidad del sistema	Alto	Bajo
Complejidad del sensor	Bajo	Alto
Rendimiento	CCD	CMOS
Respuesta	Moderado	Ligeramente mejor
Rango dinámico	Alto	Moderado
Uniformidad	Alto	Bajo a moderado
Disparo uniforme	Rápido, común	Pobre
Velocidad	Moderado a Alto	Alta
Windowing	Limitado	Extensivo
Biasing and Clocking	Múltiple, voltaje alto	Sencillo, voltaje bajo

Fuente: http://www.dalsa.com/sensors/Products/ccd_vs_cmos.aspx

3.4. Esquema general de diseño

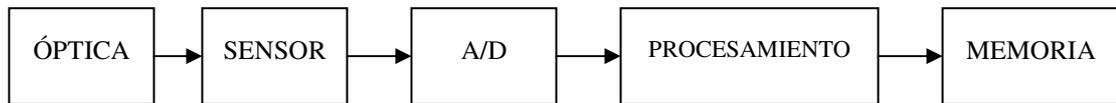


Figura 3.3. Diagrama de bloques del sistema de adquisición de imágenes

En la figura 3.3 se muestra el diagrama de bloques general que la presente tesis desarrollará. El diagrama cuenta con 5 bloques, el primero de ellos es el bloque de la parte óptica, el cual ve todo lo que concierne al diseño físico, el uso de lentes, prismas, etc. El segundo bloque es el del sensor a utilizarse, puede ser un módulo de cámara, luego la señal analógica obtenida se convertirá en una señal digital a través de un dispositivo ADC. El cuarto bloque es el de procesamiento que se realizará a través de un FPGA que hará los cálculos para obtener las imágenes multiespectrales. Y por último se almacenará en una memoria flash de formato SD (Secure Digital). Todo lo descrito anteriormente se realizará en el interior de la aeronave que volará a más de 100 metros de altura.

Se realizará la propuesta de diseño para cada uno de los bloques. A su vez se mostrará las diversas alternativas que se plantearon.

Para el diseño final se tendrá en cuenta los siguientes puntos:

1. Consumo de potencia.
2. Costo total del diseño.
3. Tamaño final del diseño.
4. Peso final del diseño.

3.5. Diseño Óptico

La parte óptica es fundamental en el diseño del sistema de adquisición de imágenes ya que es el encargado de recibir las longitudes de onda y poder captar la imagen a la distancia deseada. Por ello se analizó la factibilidad del desarrollo del diseño. El diseño abarca varios factores como la distancia focal, profundidad de la imagen, resolución, el tamaño del sensor, ondas electromagnéticas a recibir, si se desea ampliar la imagen, entre otros; de acuerdo a estos factores se elegirán los lentes, prismas, filtros, el sensor y otros dispositivos mecánicos. Por tal razón el diseño óptico no se desarrollará y se asumirá para el sistema que ya se cuenta con el diseño óptico adecuado.

3.6. Alternativas de diseño de la adquisición de imágenes

A continuación se presentará los diversos sensores y dispositivos que a lo largo de la tesis surgieron, con el objetivo de dejar por escrito todo el esfuerzo que conllevó la presente tesis. Se empezará por el dispositivo más esencial, el sensor que capture la imagen. Luego se presentará las diversas alternativas que irán adecuándose a los objetivos de la presente tesis. Por último se comparará cada diseño y se concluirá con el diseño final para el sistema de adquisición de imágenes, que se detallará en el siguiente capítulo.

3.6.1. Alternativa 1

La presente alternativa es la más simple e inmediata que se propuso. Consiste en desarrollar la electrónica para el acondicionamiento del sensor y para la obtención y procesamiento de la imagen brindada por el sensor.

El sensor CCD no tiene ningún formato a su salida razón por la cual su trabajo será más complicado. En la figura 3.4 se muestra el diagrama de bloques de esta alternativa. Como muestra la figura se debe diseñar todos los pequeños bloques que rodean al sensor, el primer bloque a diseñar es el de conversión A/D, el cual se encargará de convertir la señal analógica en señal digital. Cabe resaltar que el diagrama de bloque presentado se realizará en forma doble porque se desea obtener las ondas del espectro visible y las ondas del espectro del infrarrojo cercano.

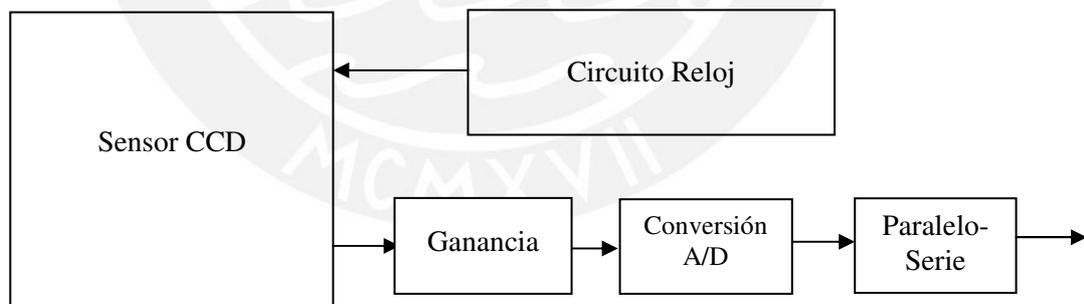


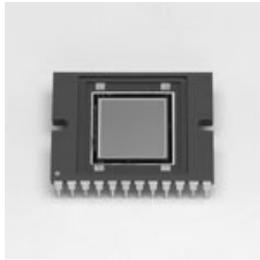
Figura 3.4. Diagrama de bloques de la alternativa 1

Se eligió el sensor CCD por las siguientes razones:

- Calidad de imagen
- Flexibilidad
- Excelente para fotografía digital
- Poca generación de ruido.

Existen muchos fabricantes de este tipo de sensor, SONY, HAMAMATSU y KODAK.

Cada uno de los fabricantes ofrecen diversos tipos de sensores CCD: Sensor cuadro completo, sensor lineal, sensor entrelazado.



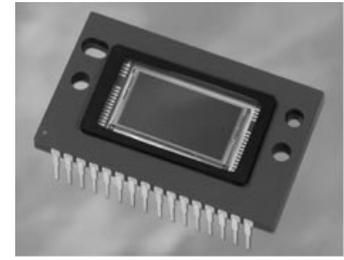
Sensor área

<http://jp.hamamatsu.com>



Sensor lineal

<http://www.kodak.com>



Sensor entrelazado

Figura 3.5. Tipos de sensores CCD

De acuerdo a estas posibilidades se eligió el sensor en forma de área pues así se capturará toda un área del objeto, en este caso una parte del cultivo.

El sensor tiene empaquetadura DIP, por lo que se hace sencillo soldarlo manualmente y así hacer las conexiones necesarias para trabajar la información de la imagen.

El sensor elegido es “CCD area image sensor S9737-01” [21] el cual presenta las siguientes características mostradas en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2. Especificaciones técnicas

Cooling	Non-cooled
Active Area	12.288 x 12.288 mm
Number of Pixels	1024 x 1024
Pixel Size	12 x 12 μ m
Frame Rate	1 frames/s
Spectral Response Range	400 to 1100 nm
Full Well Capacity (Vertical)	60 ke-
Dark Current Max. 0 deg. C	75 e-/pixel/s
Readout Noise	4 e-rms
Note	frame rate: Max.
Measurement Condition	Typ. Ta=25 deg. C, unless otherwise noted, frame rate: area scanning

Fuente: Hoja técnica del S9737-01 – www.hamamatsu.com

La tabla muestra que el sensor no tiene sistema de enfriamiento y transmite una trama por cada segundo, además da el área que cubre y el número de píxeles (ancho x alto) por cada imagen.

Este sensor elegido muestra en su hoja técnica una baja ganancia en la parte del espectro del infrarrojo cercano (de los 750 nm. hasta las 110nm.), pero en el espectro visible (400nm. hasta los 700 nm.) la ganancia es aceptable. Ver figura 3.6.

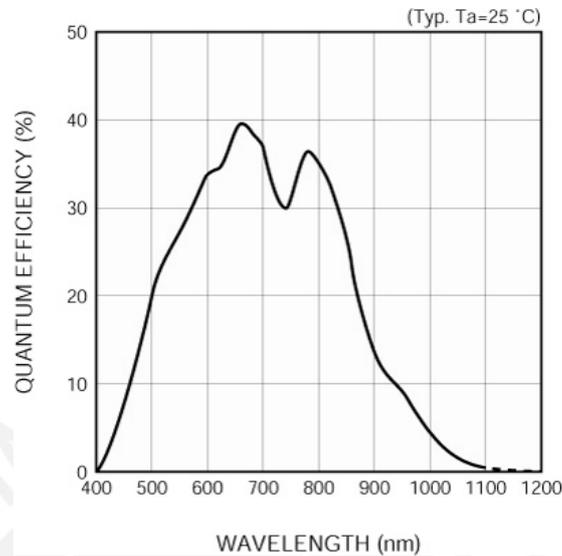


Figura 3.6. Respuesta Espectral

Fuente: Hoja técnica del S9737-01 – www.hamamatsu.com

■ Device structure, line output format (S9737-01)

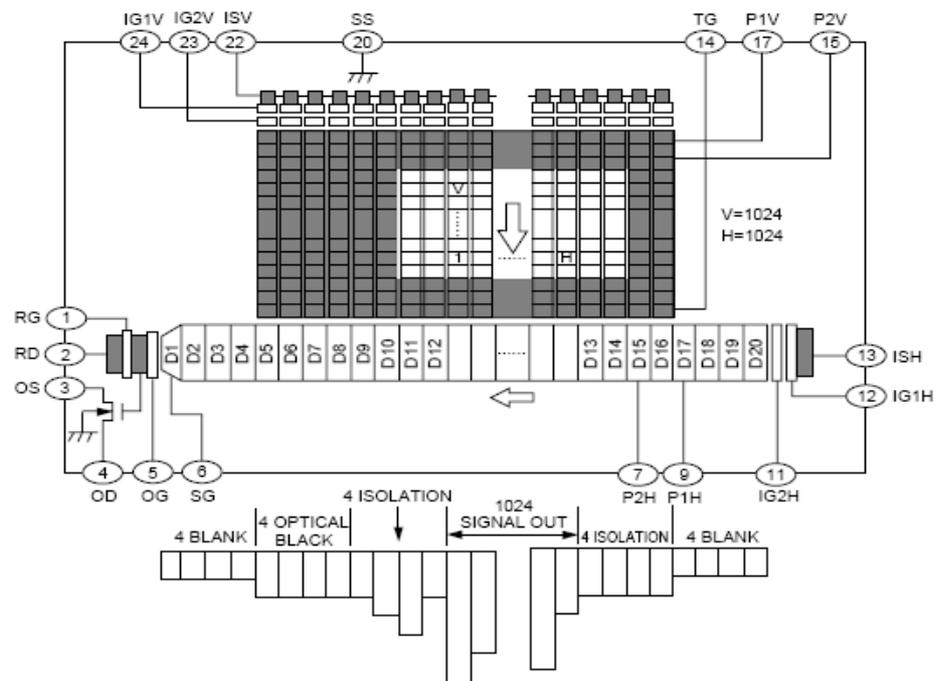


Figura 3.7. Estructura del dispositivo

Fuente: Hoja técnica del S9737-01 – www.hamamatsu.com

El sensor tiene un arreglo de 1024x1024 píxeles, su salida se da mediante un transistor MOSFET que esta internamente y se puede configurar. Ver figura 3.7.

Una vez elegido el sensor, se procede a diseñar el bloque de Conversión A/D. Para este bloque se investigaron varios dispositivos de varios fabricantes, dando como resultado la elección del siguiente dispositivo: TDA8783 del fabricante PHILIPS [19]. Este dispositivo presenta las siguientes características más resaltantes:

1. 10 bits de conversión de analógico a digital
2. Bajo consumo de potencia: 483 mW.
3. Programable.
4. Frecuencia de muestreo de 40 MHz.
5. Tamaño: 0.7cm. x 0.7cm. x 0.14cm.

Luego se procedió a buscar los otros dispositivos, pero se halló un módulo de cámara que a su salida da una señal de video analógica (NTSC). Por tal razón esta alternativa no se desarrolló.

3.6.2. Alternativa 2

Esta alternativa consiste en desarrollar y/o buscar dispositivos para el tratamiento de la señal brindada por el módulo de cámara BE-IR 20. Se presenta a continuación el diagrama de bloques del diseño basado en la utilización del módulo de cámara.

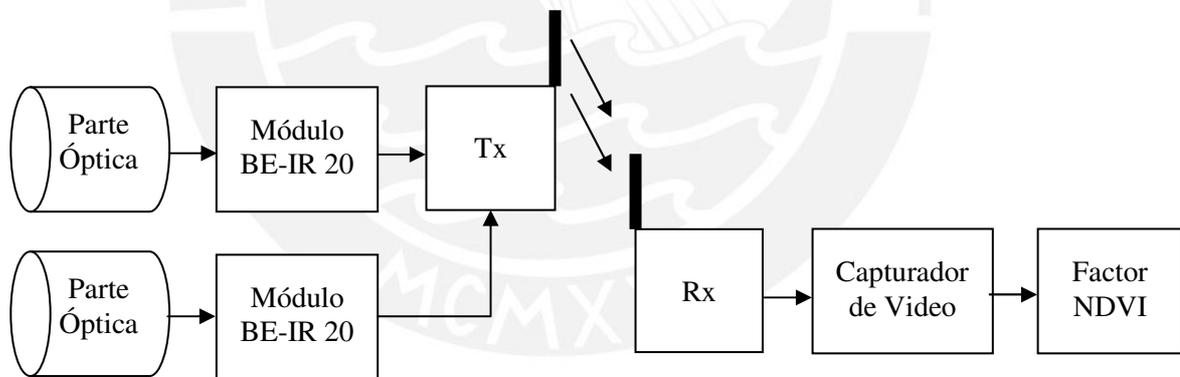


Figura 3.8. Diagrama de bloques de la alternativa 2

La figura 3.8 muestra el diseño que consta de 2 sensores y por ende dos partes ópticas. Luego ambas señales de los módulos pasarán a un transmisor el cual las mandará al receptor en tierra. Ya estando en receptor pasará a un “video capture” el cual convertirá esta señal analógica NTSC en señal digital que se transmitirá vía USB a la computadora. En la computadora se realizará el procesamiento con el factor NDVI.

Para el primer bloque del módulo BE-IR 20 [20] se utilizará el módulo de cámara encontrado, por el cual la alternativa anterior se truncó. Este sensor da como salida una señal analógica de video, ese módulo es del fabricante Hitachi Kokusai Electric Inc. [20] que tiene por nombre Near-Infrared B/W Camera Module; módulo de cámara en blanco y negro que tiene un rango espectral desde 400 nm. hasta los 1000nm; es decir cubre el espectro visible y el espectro del infrarrojo cercano. Este módulo se basa en un sensor CCD tipo transferencia de cuadro interlineal. Ver figura 3.9.

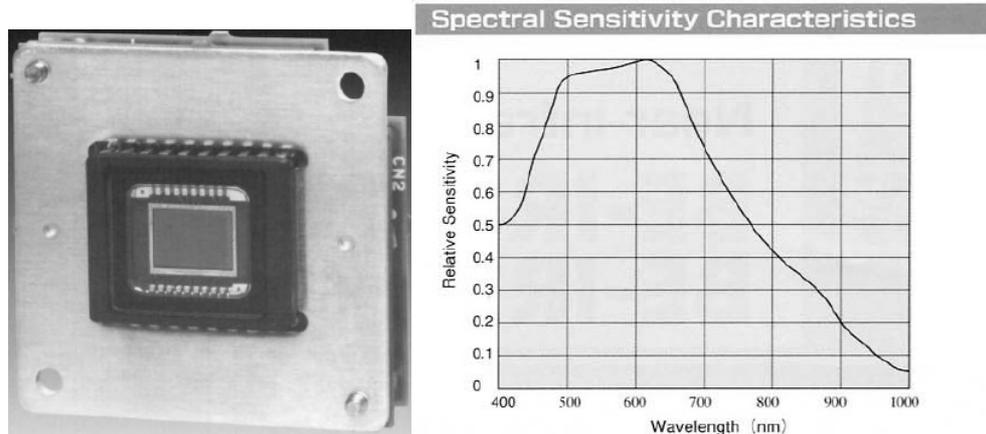


Figura 3.9 Módulo de cámara de Infrarrojo cercano en blanco y negro

Fuente: Hoja técnica del BE-IR20 – www.hitachi.com

NEWCO Inc., uno de los proveedores, cotizó el módulo BE-IR20 en US\$ 475 sin incluir los impuestos y gastos de envío. Otro proveedor, CCTV Shopping, empresa dedicada a la venta de sistemas y equipos de seguridad, cotizó el mismo módulo BE-IR 20 en US\$480 sin incluir impuestos y gastos de envío. Ambos proveedores son de Estados Unidos.

A partir de la hoja técnica se menciona las especificaciones más importantes:

1. Respuesta Espectral hasta los 1000 nm.
2. Resolución: 560(H), 575(V) líneas de TV.
3. Señal estándar: CCIR Monocromo. Señal NTSC.
4. Sincronización interna.
5. Sensibilidad estándar de 30 lux.
6. Salida de video compuesto de 1.0 Volt p-p 75 ohms.
7. Peso: 17 gramos.
8. Consumo de corriente: 160 mA.
9. Tamaño del módulo: Ancho: 3.4 cm., Largo: 3.4 cm, Grosor: 2 cm.

Este módulo se puede conectar directamente a un micro-procesador para procesar la imagen, a un monitor de video e inclusive a la televisión. Para este módulo se necesita comprar adicionalmente una montura de lente y el cable para obtener la señal NTSC. Con este sensor se concluye que se obtendrá una señal NTSC como entrada para así adecuar los componentes electrónicos al diseño final.

Para los bloques del transmisor y el receptor, se utilizarán dispositivos que se importarán. Se revisó varios proveedores eligiendo a JAMECO por el menor precio que ofrecen por los transmisores. Se utilizarán los siguientes equipos:

Transmisor inalámbrico de audio y video de 2.4 GHz de 4 canales [29]. Tiene las siguientes características más importantes:

1. Rango de transmisión de 150 m. en exteriores y 50 m. en interiores.
2. 4 canales selectivos para transmisión.
3. Potencia de salida: 10mW.
4. Salida de video: 1Vp-p Compuesto
5. Peso: 816.462 g.
6. Tamaño: largo (11.43cm.), ancho (8.128cm.), alto (2.52 cm.)

Receptor inalámbrico de audio y video de 2.4 GHz de 4 canales [29]. Tiene las siguientes características más importantes:

1. Detección de pérdida de video y congelamiento de canal.
2. Sistema protector de memoria no volátil contra pérdida de energía.
3. Peso: 816.462 g.



Figura 3.10. Transmisor y Receptor

Fuente: Video accesories y transmitters – www.jameco.com

3.6.3. Alternativa 3

La alternativa 3 consiste en obtener la imagen NDVI con dispositivos que permitan realizar la operación de este factor. Se trabajará con la señal NTSC como entrada y como salida se obtendrá la señal NDVI. El factor NDVI, es un índice que cuantifica la densidad del crecimiento de la planta. Para cuantificar este crecimiento se basa en la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

La fórmula utiliza las longitudes de onda del espectro del infrarrojo cercano y las longitudes del espectro visible (en especial el rango de longitudes de onda del color rojo). Esta operación se realiza en forma analógica y también puede realizarse en forma digital (píxeles).

La señal NTSC tiene dos componentes las cuales tienen una modulación en amplitud y en fase, esto significa que la información está contenida en esas dos componentes de la señal. Este detalle de la modulación afecta de manera importante en el diseño pues se puede perder información importante.

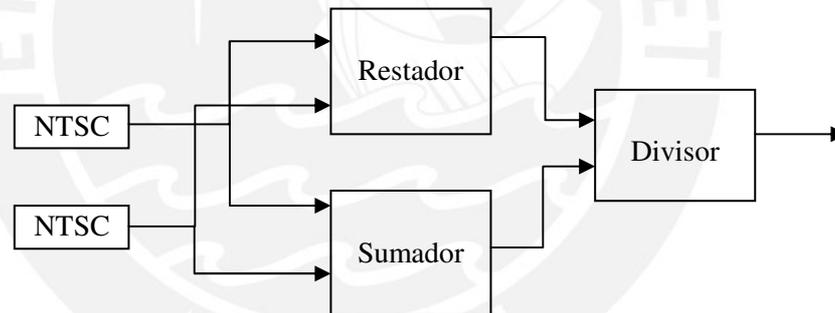


Figura 3.11. Diagrama de bloques de la alternativa 3

3.6.4. Alternativa 4

La presente alternativa consiste en procesar la señal NTSC a través de un FPGA y almacenarlo en una memoria SD. Primero se debe digitalizar la señal de video analógico NTSC/PAL y se hará a través del decodificador de video. Se muestra a continuación el diagrama de bloques en la figura 3.12.

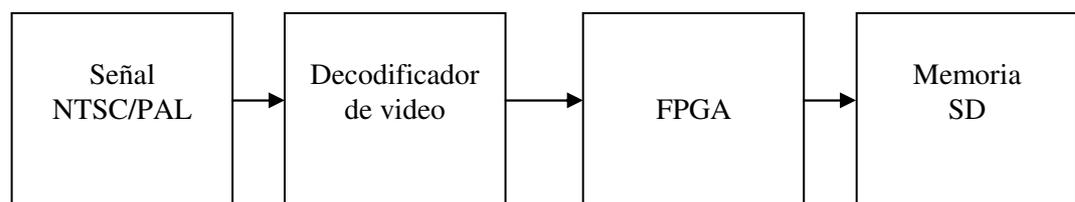


Figura 3.12. Diagrama de bloques de la alternativa 4

Para esta alternativa se obvia la parte óptica y de transmisión, delimitando el diseño y dando importancia a estos bloques que son los más necesarios e imprescindibles. Este sistema trabajará en el interior de una aeronave que volará por encima de los 100 m., además interactuará con un sistema de control de la aeronave. Para el diseño de cada uno de los bloques se utilizarán los siguientes dispositivos:

Para el bloque de la señal NTSC, se podrían utilizar los siguientes dispositivos:

- El módulo de cámara BE-IR 20 ya explicado.
- El módulo de cámara RHPC – 2005(PAL).
- El módulo de cámara CMUCam3.

Para el bloque de decodificador de video se utilizarán el decodificador de video de ADV7180, del fabricante Analog Devices.

Para el bloque de FPGA [25], se empleará el FPGA ALTERA CYCLONE II EP2C35F672C6.

Y para el bloque de la memoria SD se utilizará el módulo DOSonCHIP-SD1.

Se procederá a explicar y detallar los dispositivos mencionados:

Módulo de cámara RHPC – 2005

Se buscó más módulos de cámaras y se encontró la página web: <http://oemcameras.com>, la cual muestra una variedad de módulos de cámaras con lentes ya definidos y sobrepuestos en cada módulo. OEMCameras está dirigido para aplicaciones militares, de seguridad, científica e industrial.

Todos los módulos tienen características similares las cuales se mencionan a continuación:

1. Sensores de imagen CCD del fabricante SONY.
2. Son sensores de forma de entrelazado.
3. A la salida del módulo tienen una señal analógica de video NTSC o PAL.
4. Los módulos son pequeños que van desde 2.2 (cm.) x 2.2 (cm.) hasta 4.2 (cm.) x 4.2 (cm.)
5. Algunos tiene en sus lentes zoom digital.
6. Todas tienen filtro IR.

Se realizó consultas con el vendedor y se pudo comprobar que se puede remover el filtro IR y que se pueden tomar imágenes a más de 100 m. Se eligió el módulo RHPC

2005[31] con los lentes 3.0mm f2.8 D-Mt Micro Lens. Todo este módulo tiene el precio de US\$ 169.95 sin gastos de envío. Se muestra a continuación este módulo en la figura 3.13.

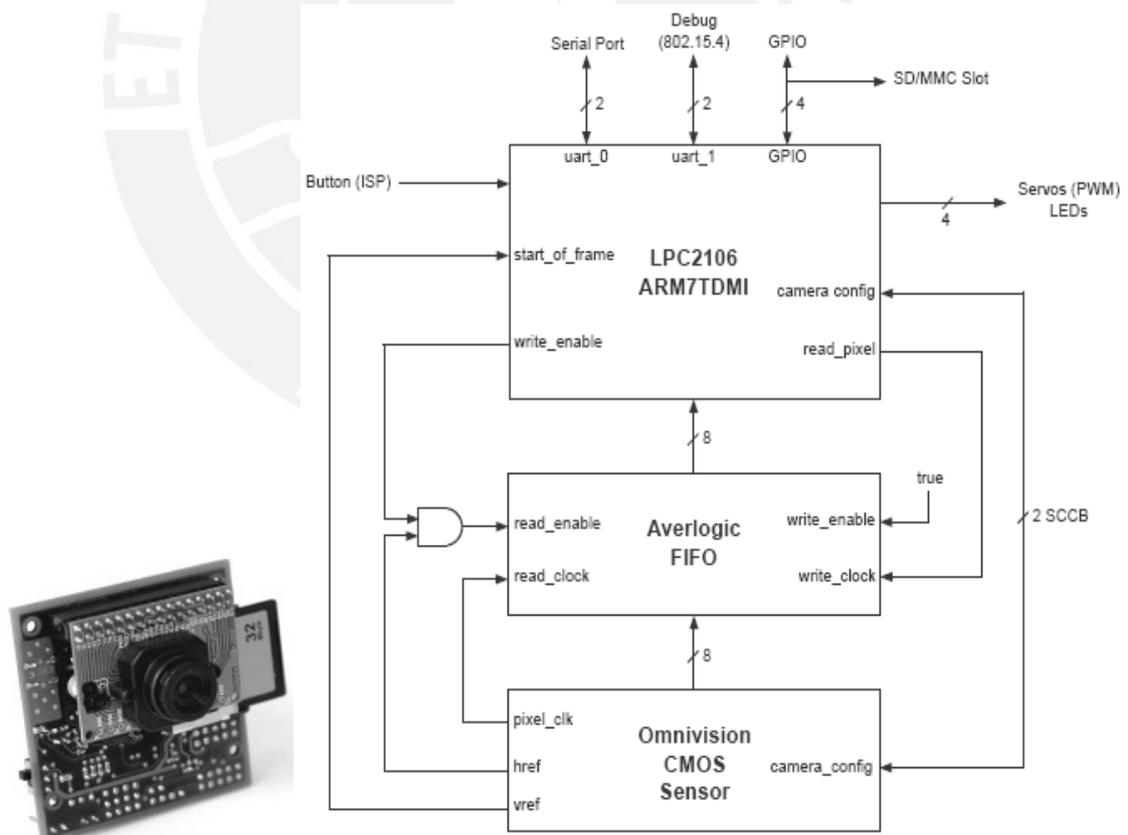


Figura 3.13. Módulo RHPC – 2005(PAL)

Fuente: <http://oemcameras.com>

Módulo de cámara CMUCam3

Es un módulo de cámara con características adicionales como almacenamiento en una memoria MMC y transmisión serial. Este módulo tiene un procesador ARM7TDMI programable y un módulo de cámara con sensor CMOS del fabricante OMNIVISION. El módulo y su diagrama de bloques se muestra en la figura 3.14 [26].



Fuente: <http://www.cmucarm.org>

Figura 3.14. Módulo CMUCam3 y su diagrama de bloques [26]

El módulo CMUCam3 tiene tres bloques principales los cuales están relacionados. El primer bloque es el procesador Philips LPC2106, el cual se encarga de gestionar los procesos para interactuar con los otros bloques y procesar el video. El segundo bloque es un buffer donde se almacena temporalmente la imagen. Y el tercer bloque es del sensor CMOS.

El módulo presenta las más resaltantes características:

1. Resolución CIF: Son imágenes pequeñas que equivale a 352 x 288 píxeles.
2. Ranura MMC con controlador FAT16.
3. Almacenamiento de imágenes en la memoria de 26 fotogramas por segundo.
4. Formato de compresión JPEG.
5. Librería básica de manipulación de la imagen:
 - a. Arbitrario recorte de imagen.
 - b. Modificar las propiedades de la imagen.
 - c. Funciones de umbral y de convolución.
 - d. RGB, YCrCb.
6. Salida de video PAL o NTSC.
7. Código libre programado en lenguaje C.
8. Conector Wireless Mote Networking (802.15.4).- Tmote Sky / Telos Connection.

Ahora se explicará el ARM7TDMI y el sensor CMOS:

ARM7TDMI:

El núcleo ARM7TDMI es un procesador RISC embebido de 32 bits. Este procesador esta optimizado para proporcionar la mejor combinación de rendimiento, potencia y cobertura. Por lo tanto permite un diseño de pequeño tamaño, baja potencia y alto rendimiento.

Sensor CMOS:

Como el módulo de sensor CMOS se puede instalar en el CMUCam3 como se ve en la figura N°18. Por lo tanto se puede elegir los módulos que recomiendan CMUCam.

Estos módulos son OV6620/OV6621 y OV7620, ambos del fabricante OMNIVISION.

Se mostrará a continuación un resumen mencionando algunas de las características más importantes de cada uno de los módulos:

El módulo OV6620 [27] es un sensor CMOS que a su salida da una imagen a color CIF. Y el módulo OV6621 es lo mismo sólo que da una imagen en blanco y negro CIF.

Ambos tienen las siguientes características más importantes:

1. 101 376 píxeles, sensor de 1/4 " / imagen CIF.
2. Lectura de escaneo progresiva.
3. Formato de datos – YCrCb 4:2:2, RGB 4:2:2
4. 8/16 bits de datos de video: CCIR656, CCIR601.
5. Amplio rango dinámico, anti-blooming.
6. Operación con 5V, bajo consumo de potencia.
7. Mejora de imagen: brillo, contraste, gamma, saturación, nitidez, etc.
8. Corrección de gamma (0.45/0.55/1.00)
9. Programable vía SCCB (Serial Control Camera Bus): Saturación del color, brillo, contraste, ganancia, balance de blanco.

El módulo OV7620 [28] es un sensor CMOS que da a su salida una señal de video VGA. Y tiene las siguientes características:

1. 326 688 píxeles, sensor de 1/3 " / formato VGA.
2. Lectura de escaneo progresiva y entrelazado.
3. Formato de datos – YCrCb 4:2:2, RGB 4:2:2
4. 8/16 bits de datos de video: CCIR656, CCIR601.
5. Video: 525 líneas y 30 cuadros por segundo.
6. Amplio rango dinámico, anti-blooming.
7. Operación con 5V, bajo consumo de potencia.
8. Mejora de imagen: brillo, contraste, gamma, saturación, nitidez, etc.
9. Programable vía SCCB (Serial Control Camera Bus): Saturación del color, brillo, contraste, ganancia, balance de blanco.

Ambos módulos pueden ser programados para proporcionar determinada cantidad de bits en formato digital. Y las aplicaciones que recomiendan son Videoconferencia, Video llamada, video correo, imagen fija y PC Multimedia.

Una de las características más resaltantes ya mencionada al inicio es la ranura de almacenamiento la cual se adecua al diseño de la presente tesis.

La página web de CMUCam3 (<http://www.cmucam.org/>) recomienda lo siguiente:

1. Tarjetas de almacenamiento que trabajan correctamente con la CMUCam3:
 - a. Pqi 128MB MMC.
 - b. SanDisk 2GB/1GB/512MB Tarjetas SD.
 - c. Tarjetas MMC SanDisk de 512MB.
 - d. Transcend SD de 1GB (rendimiento bajo).

2. Tarjetas de almacenamiento que tienen problemas con la CMUCam3
 - a. Tarjeta miniSD SanDisk de 256MB.
 - b. Cannon MMC 16MB

Dicha página web también muestra los proveedores, dentro de los cuales se consultó a proveedores de Estados Unidos e Inglaterra. Cada uno de los proveedores tienen diversos precios en dólares americanos (US\$) y en libras esterlinas (£). De los proveedores de Estados Unidos Seattle Robotics da el precio de US\$239.00 y de los proveedores de Inglaterra está Active Robots que da el precio de £99.99 con £35.00 de gastos de envío.

Como el módulo CMUCam3 tiene un filtro IR se consultó en el foro de la página web donde el fabricante Seattle Robotics responde que se puede adquirir sin el filtro IR. Con esto se abarca el espectro del infrarrojo cercano. Ver Anexo 1.

CMUCam3 además da gratuitamente la hoja técnica en la cual se muestra todas las partes de la tarjeta, las posiciones de todos los componentes e inclusive da toda la relación de todos los componentes utilizados para el respectivo ensamblaje.

Decodificador ADV7180

Para decodificar la señal de video NTSC se requeriría dispositivos que trabajen con video e imagen, por lo cual el fabricante ANALOG DEVICES, recomendado por el Ing. Andrés Flores, tiene soluciones con alto rendimiento para el procesamiento de las señales en general. El fabricante muestra varios dispositivos. Ver Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Cuadro comparativo de los decodificadores de video

N° Parte	Resolución (Bits)	Resolución Salida (bits)	Formato color de entrada	Formato de información de salida	N° canales de entrada	Disipación de Potencia (mW)	Precio (1000 pcs.)
ADV7441A	10	-	-	-	-	-	**
ADV7180	10	8	NTSC; PAL; SECAM	8 & 16-bit YCbCr 4:2:2	6	250	\$5.70
ADV7181B	9	8	NTSC; PAL; SECAM	8 & 16-bit YCbCr 4:2:2	6	450	\$6.95
ADV7184	10	8	NTSC; PAL; SECAM	8 & 16-bit YCbCr 4:2:2	12	550	\$8.50
ADV7188	12	10	NTSC; PAL; SECAM	8 & 16-bit YCbCr 4:2:2	12	550	\$11.38
ADV7441	10	-	-	-	-	-	\$13.95
ADV7401	10	8	NTSC; PAL; SECAM	12-bit RGB DDR; 24-bit YCbCr/RGB 4:4:4; 8 & 16-bit YCbCr 4:2:2	12	550	\$14.75

Fuente: <http://www.analogdevices.com>

De la tabla 3.3 se pueden elegir dos dispositivos, el ADV7181B [22] y ADV7180 [23], por las siguientes razones:

- Precio
- Consumo de potencia

Ambos decodificadores detectan y convierten automáticamente una señal analógica de televisión como el NTSC, PAL y SECAM en una componente de video 4:2:2 con 16 o 8 bits en formato CCIR601/CCIR656. Son programables y controlan las características de video como saturación, brillo, etc. Tiene la opción de empaquetadura LQFP de 64 pines.

Así como tiene similitudes tienen diferencias y estas son pocas pero las determinantes para la elección del decodificador. El ADV7180 tiene 86 MHz de velocidad de conversión, 10 bits de resolución, 250 mW de potencia y su interfaz de salida digital es simple la cual puede conectarse una gama de codificadores MPEG, procesadores de video móvil, etc.

En cambio el ADV7181B tiene 54 MHz de velocidad de conversión, 9 bits de resolución, 450 mW de potencia y su interfaz de salida digital es altamente flexible que permite tener un buen rendimiento en la decodificación de video y en la conversión en línea bloqueado.

Para el diseño final se utilizará ADV7180 porque tiene bajo consumo de potencia 250mW y para el diseño es vital el bajo consumo de corriente.

FPGA Altera Cyclone II EP2C35F672C6

FPGA, de las siglas en inglés Field-programmable gate array. Es un dispositivo semiconductor que contiene componentes lógicos que están interconectados entre sí a través de unos canales de conexionado donde tanto las células como los canales son programables para permitir la personalización del diseño [25]. También se tiene en cuenta las células de entrada/salida que permite la comunicación entre la lógica interna con el exterior. Los componentes lógicos pueden ser compuertas lógicas como OR, AND, etc.

Estos dispositivos ayudan a realizar diseños digitales de alta complejidad. Los diseños implementan una gran multitud de funciones, las cuales deben realizarse de forma rápida y precisa. Cuando se hace la descripción lógica de un diseño se utilizan lenguajes de descripción lógica como VHDL, Verilog, JHDL, entre otros.

Dentro de sus aplicaciones están el procesamiento de señales digitales, imágenes médicas, visión por computadora, criptografía, etc. Existen varios fabricantes como Xilinx, Altera, Actel, Atmel, Lattice Semiconductor. Los que lideran el mercado de estos dispositivos son Xilinx y Altera.

El Laboratorio de Procesamiento Digital de Señales (Laboratorio de DSP) de la Pontificia Universidad Católica del Perú cuenta con dos módulos educativos con FPGA, el “The XUP VIRTEX-II PRO” y el “The Altera® Development and Education (DE2)”. El primer módulo está basado en el FPGA VIRTEX-II PRO XC2VP30 de XILINX; y el segundo módulo está basado en el FPGA ALTERA CYCLONE II EP2C35.

Para la elección del FPGA [24] existen una gran diversidad de fabricantes, tecnologías, de diversos pines y empaquetaduras, etc. Por tal razón se elegirá el FPGA analizando los dos módulos educativos con que cuenta el laboratorio de DSP. Solo un módulo educativo, la DE2, tiene entrada de video, entonces se trabajará con este módulo. Además este módulo trabaja con el FPGA ALTERA CYCLONE II EP2C35F672C6.

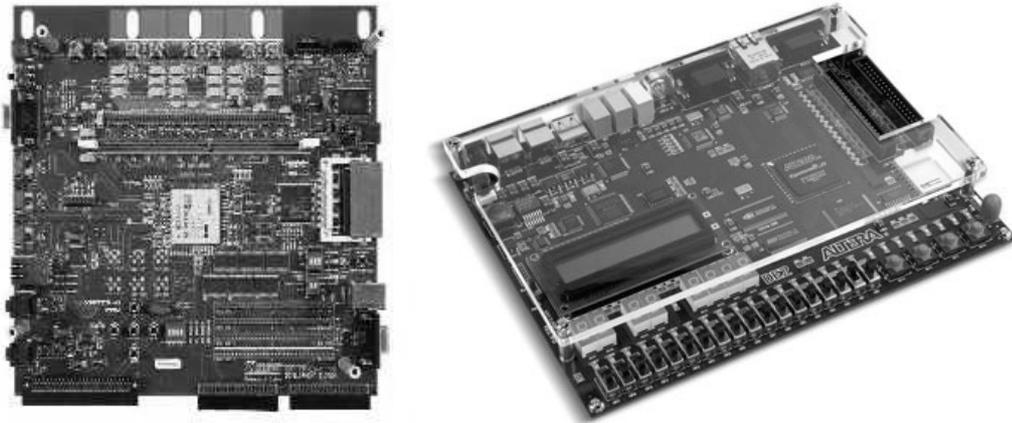


Figura 3.15. Módulos Educativos de Xilinx y Altera

<http://www.xilinx.com/univ>

<http://university.altera.com>

De la página web de Altera, muestra en forma general los beneficios del FPGA Cyclone II e indica lo siguiente:

1. Arquitectura de bajo costo.- Ofrece hasta 68,416 elementos lógicos, 3 veces que la primera generación de Cyclone FPGA.
2. Soluciones DSP de bajo costo.- Se puede usar como coprocesador para el procesamiento digital de señal dando un alto rendimiento por precio, entre las aplicaciones está el procesamiento de video e imagen, sistemas de comunicaciones y funciones comunes de DSP.
3. Soluciones de Procesamiento embebido.- Tiene un procesador embebido de la familia Nios II, el cual está dentro del FPGA y provee un costo efectivo para las soluciones de procesamiento para el precio y aplicaciones intensivas en computadoras.
4. Bajo consumo de potencia.- Consume la mitad de potencia que los FPGA de 90 nm. reduciendo drásticamente la potencia estática y dinámica.
5. Alto rendimiento.- Son 60% más rápidos que los FPGA de 90nm.

Se mencionó el FPGA de 90 nm que es una tecnología de FPGA.

Dentro de las características expuestas anteriormente, se tomará en cuenta el bajo consumo de potencia, en la figura N°3.16 se muestra su consumo y se compara con la otra tecnología de FPGA.

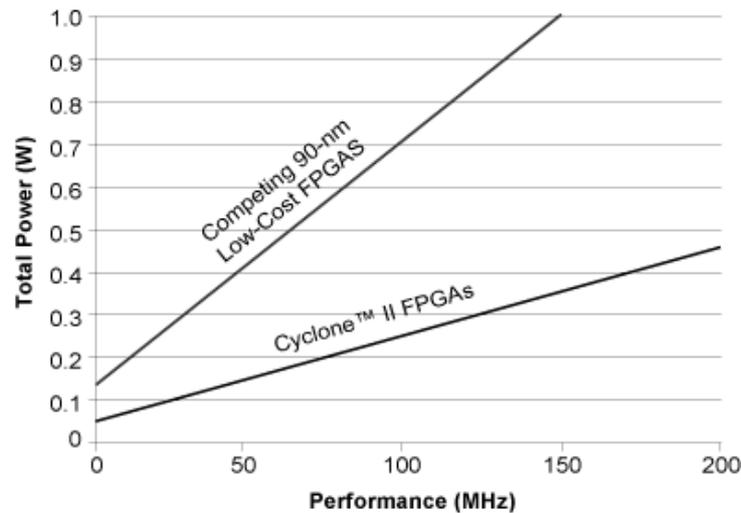


Figura 3.16. Comparación del peor caso de potencia total

Fuente: FPGA Altera Cyclone II – www.altera.com

Como se empleará video, se necesita que se haga a 27 MHz y según la relación en el gráfico se obtiene que se consumirá 0.1 W. Si se emplea una fuente de 3.3v se consumirá 30 mA. Según este pequeño análisis el FPGA del módulo DE2 es ideal para trabajar con el sistema de adquisición de imágenes.

Módulo DOSonCHIP-SD1

Uno de los últimos bloques del diseño es el de almacenamiento. Para este diseño existen diversos dispositivos para almacenar las imágenes, diskettes, CD-ROMs, DVDs, memorias SD, memorias MMC, memoria USB, etc.

Para la elección tenemos que tener en cuenta los siguientes requerimientos:

1. Tamaño pequeño.
2. Gran capacidad de almacenamiento.
3. Peso liviano.

Con estos requerimientos la elección se vuelve sencilla, pues dentro de los dispositivos de almacenamiento sólo las memorias SD cumplen estos tres requerimientos.

Para almacenar en la memoria SD, se investigó diversos dispositivos y se eligió el módulo DOSonCHIP, mostrado en la figura 3.17. Este módulo es del tamaño de la memoria SD como se muestra en la figura.



Figura 3.17. Módulo DOSonCHIP-SD1

<http://www.dosonchip.com/store.html>

El DOSonCHIP-SD1 es un módulo que integra el CD17B10 y el socket SD/MMC como se muestra en la figura 3.17. El CD17B10 es un chip que proporciona una interfaz de almacenamiento masivo como tarjeta de comunicación. Utiliza en la comunicación los buses UART, SPI o I2C para la navegación de los directorios de archivos, lectura o escritura de datos. El DOSonCHIP-SD1 tiene las siguientes características:

1. Socket de 3.048cm. x 4.064cm.
2. Consumo de corriente de 5mA.
3. Reloj de cristal de 32.768KHz.
4. Bajo consumo de energía.
5. Compatible con los sistemas de archivos FAT32 y FAT16.
6. Pines de I/O que soportan 5V.

Dentro de sus aplicaciones se encuentran el registro de datos, base de datos de GPS móviles, almacenamiento de archivos de audio y video, configuración de FPGA para almacenamiento y para electrónica de consumo portátiles. El precio del módulo es mostrado en la página web y es de \$39.95.

3.6.5. Alternativa 5

La presente alternativa es una fusión de las alternativas anteriores, pues se toma algunos de los conceptos y dispositivos mencionados anteriormente. La alternativa tiene el siguiente diagrama de bloques que se muestra en la figura 3.18.

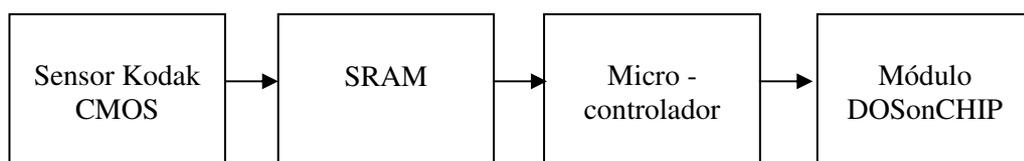


Figura 3.18. Diagrama de bloques de la alternativa 5

La figura 3.18 muestra el diagrama de bloques del diseño electrónico basándose en el sensor KODAK, que se controlará a través de un micro-controlador LPC2106 que permite trabajar con grandes archivos. La imagen que se capturará del sensor, será temporalmente almacenada en la memoria SRAM para luego pasarlo al módulo DOSonCHIP.

Esta alternativa es una mezcla de las alternativas anteriores pues se tomó el concepto. De la primera alternativa se utilizó el desarrollo de la electrónica del sensor CMOS. Luego la idea de utilizar un micro-controlador y una SRAM fue de la alternativa 4, específicamente la idea que proporciona el módulo CMUCam3.

En este módulo se empleó una FIFO, un almacenador temporal, se buscó una FIFO con 12 bits pero no se encontró por tal razón se buscó una SRAM con 12 bits. A continuación se mostrará un resumen general de cada dispositivo del diseño.

El sensor CMOS KODAK elegido es el KAC-9618 [32]. El sensor se muestra la figura 3.19.

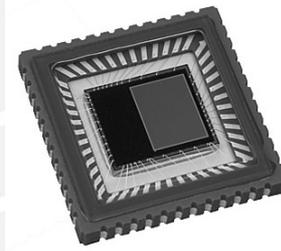


Figura 3.19. Sensor KODAK KAC-9618

Fuente: www.digikey.com

Este sensor tiene las siguientes características:

- Operación de video y toma de imagen.
- Escaneo y ganancia de los bits programable.
- Sensor programable vía I2C.
- Corrección y compensación de oscuridad de píxeles.
- Bajo consumo de corriente.
- Imágenes de 648 x 488.
- Entrega información digital de 8, 10 y 12 bits.

La SRAM elegida es el CY7C1061. Este dispositivo se muestra en la figura 3.20.



Figura 3.20. SRAM CY7C1061

Fuente: www.digikey.com

Este dispositivo tiene las siguientes características:

- Velocidad de lectura / escritura de los bits de 10 ns.
- Potencia de 990 mW.
- Operación del sensor de 3.3 V.
- Salidas compatibles de TTL.
- Borrado de memoria con pines de selección.
- Capacidad de 16Mb.
- 16 bits de cada dirección de cada espacio de memoria.

El micro-controlador elegido es del fabricante Philips. En la alternativa anterior se detalló su arquitectura. Se muestra en la figura 3.21.

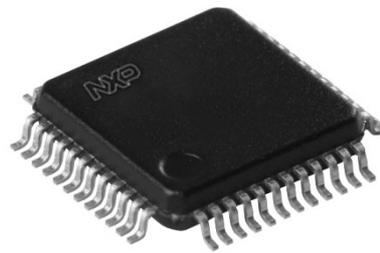


Figura 3.21 Micro controlador LPC2106

Fuente: www.digikey.com

El dispositivo tiene las siguientes características:

- 128 KB de memoria Flash / 64 KB de memoria SRAM
- Interfaz de I²C / SPI.
- Programable vía ISP.
- Operación de CPU de 60MHz.
- Alimentación del CPU de 1.65 V.
- Alimentación de los pines I/O de 3.0 V.

El módulo DOSonCHIP al igual que el micro-controlador se detalló en la alternativa anterior.

3.7. Comparación entre alternativas

Como se mencionó al inicio la elección del diseño se debería a ciertos factores, como el tamaño, el consumo de corriente, el costo y el peso. Pero además también se analizará si el diseño es factible de realizar y fácil de implementar.

En la alternativa 1 se desarrollaría toda la electrónica para el sensor de tecnología CDD. Este sensor proporciona información analógica por lo cual se tiene que convertir a información digital, además los píxeles se escanea uno por uno para obtener la imagen. Se descartó esta alternativa por encontrar un módulo que entrega la imagen.

En la alternativa 2 se utiliza un módulo que ya entrega señal de video NTSC. Este módulo tiene un costo de US\$ 475.00. Por lo tanto la señal de video se transmitirá por radio, y estos dispositivos tienen un precio de alrededor de US\$250. Se encontró mejores módulos de video con precios más bajos y de tamaños pequeños. Por lo cual la alternativa 2 se descartó y se propuso la alternativa 4, el cual es más complejo, y se tiene ya una señal NTSC que se decodificará con un decodificador de video y se procesará con un FPGA, almacenando en una memoria SD. Esta alternativa también es costosa debido al FPGA.

La alternativa 3 surgió mientras se desarrollaba la alternativa 2 y 4. En esta alternativa se deseaba tener la imagen multiespectral con el factor NDVI tratando analógicamente las señales NTSC pero encontramos dificultades con la modulación de la señal.

Finalmente la alternativa 5 surgió fusionando algunos de los dispositivos de las alternativas anteriores y esto se debió a que se encontró el sensor KODAK KAC-9618. Analizando este sensor se vio que arrojaba información digital y que además abarcaba hasta los 1000 nm. Analizando los costos de cada dispositivo se vio que el diseño no superaría los US\$ 150.00. Adicionalmente el sensor es fácil de programarlo y controlarlo.

Por tal razón la alternativa 5 es la escogida para el desarrollo del sistema de adquisición de imágenes. Esta alternativa 5 se desarrollará y detallará en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

MULTIESPECTRALES

El presente capítulo desarrollará más a fondo el diseño elegido en el capítulo anterior. El diseño consta de un sensor, un dispositivo de almacenamiento temporal, un microcontrolador y finalmente de una memoria SD. Se mostrará la forma de adquirir la imagen del sensor Kodak KAC9618 [32] y se plantearán los diagramas de flujo para la adquisición y almacenamiento de la imagen.

4.1. Diseño del Sistema de Adquisición de imágenes multiespectrales

En la figura 4.1 se muestra el diagrama de bloques más específico; detallando el número de pines para cada uno de los componentes. Recordando que el LPC2106 programará los dispositivos (KAC-9618 [32], Módulo DOSonCHIP [35] [36]) y controlará el momento de la adquisición de la imagen para almacenarlo en el módulo DOSonCHIP que utilizará una memoria SD.

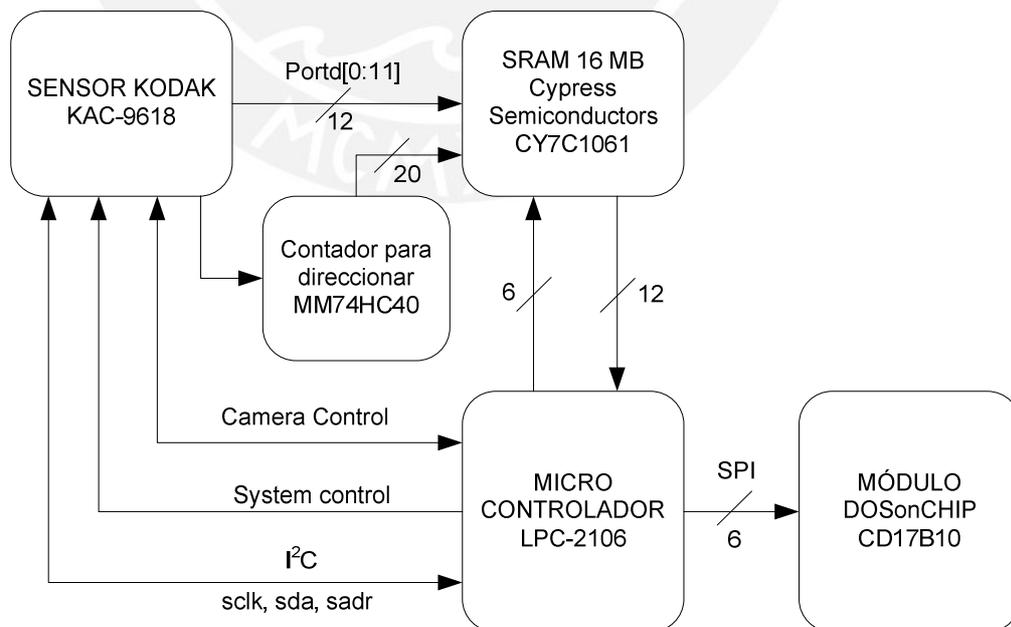


Figura 4.1. Diagrama de bloques del Sistema de Adquisición de imágenes multiespectrales

4.2. Sensor Kodak KAC-9618

El sensor Kodak KAC-9618 [32] es un sensor de imagen de tecnología CMOS que da a la salida información digital. Se adjunta en el Anexo 2 la hoja de datos del sensor. El sensor tiene el siguiente diagrama de bloques:

Overall Chip Block Diagram

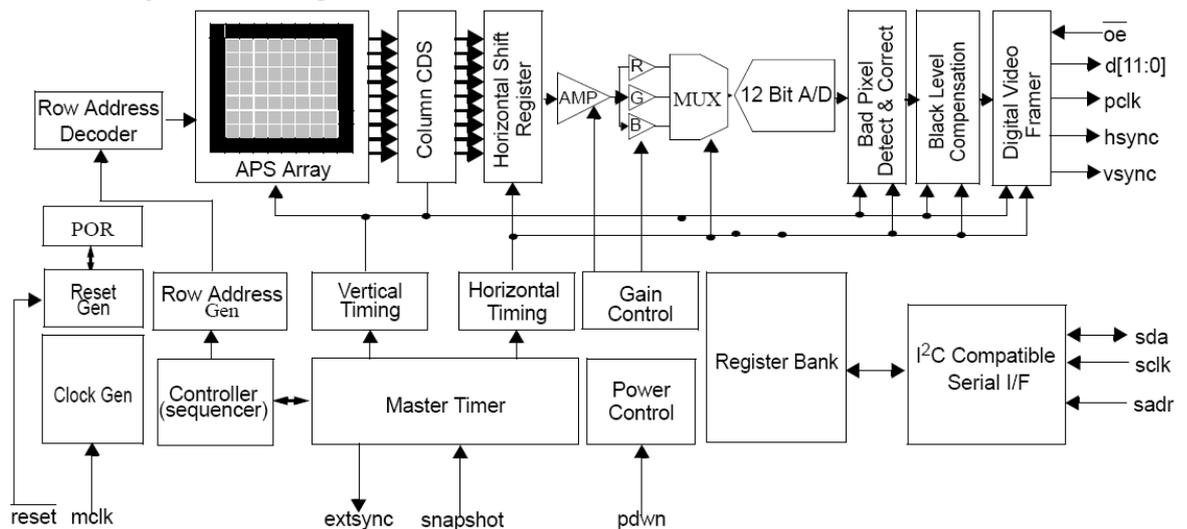


Figura 4.2. Diagrama de bloques del sensor Kodak KAC-9618

Fuente: Kodak KAC-9618 CMOS Image – <http://www.kodak.com>

Se programa vía I²C a través de los pines sda, sclk y sadr. El pin sadr permite enviar la información a programar, la dirección y los valores de la opción a seleccionar; es por eso que está en constante contacto con el Register Bank (banco de registros). El bloque del Master Timer permite la opción de controlar cuando se quiere tomar una imagen. Este bloque está relacionado con Vertical & Horizontal Timing que a su vez interacciona con el APS Array donde se encuentra el área que recibe la imagen y con los otros bloques donde se amplifica, convierte de analógico a digital, detección y corrección de píxeles negros y luego lo muestra a la salida. Se puede tener un reloj externo o usar el interno para la frecuencia de muestreo de las imágenes. El APS Array tiene un arreglo de 488 filas x 648 columnas.

El sensor es programable vía el protocolo de comunicación I²C, algunas de las cosas que se pueden programar son:

- El modo de escanear los píxeles (progresivo, interlineado).
- El modo de sub-muestreo de los píxeles (2:1 y 4:2).
- La integración parcial o total de los píxeles cuando integra la luz incidente.
- La ganancia en general o individuales.

- e) Modo monocromo o RGB.
- f) La selección de la región de escaneo de la imagen.
- g) La opción de video o la captura de imagen.
- h) La cantidad de bits a la salida del sensor (12, 11, 10, 9, 8 bits).
- i) La cantidad de cuadros de imagen por segundo (30, 15, 7.5, 4, 2, 1).

Para programar se tiene los pines sda (serial data), sclk (serial clock) y sdr (device address select). Para la escritura y lectura de los datos se realizan de la siguiente manera:



Figura 4.3. Operación de escritura en el bus

Fuente: Kodak KAC-9618 CMOS Image – <http://www.kodak.com>



Figura 4.4. Operación de lectura en el bus

Fuente: Kodak KAC-9618 CMOS Image – <http://www.kodak.com>

En la figura 4.3 y figura 4.4 se muestran los formatos respectivos para escritura y lectura en el puerto sda. En ambas figuras las letras “S” y “P” son la condición de inicio y parada de cada formato. Para la escritura en alguna dirección se empieza por mandar la condición de inicio “S” que se realiza con un flanco de bajada en el pin sda mientras sclk está en 1, luego se envía Device Address (“1010101” cuando sdr está en 0 “0110011” cuando sdr está en 1) y W debe ser 0 para escritura. Luego espera la señal “A” que es la respuesta del sensor que ha recibido correctamente, luego se envía la dirección del registro a programar, se espera nuevamente la señal “A” para así enviar la trama de bits para la configuración, se espera por última vez la señal “A” y recién mandamos el comando de condición de parada “P”.

De manera parecida sucede con la operación de lectura, sólo que se vuelve a enviar la señal de condición de inicio “S” y el “Device Address” y el bit de lectura “R” para que el sensor envíe la señal “A” y los bits del registro a leerse, por último se le debe responde con la señal negada de “A” y la condición de parada “P”.

A continuación se muestra en la figura 4.5 el formato de bytes en el puerto.

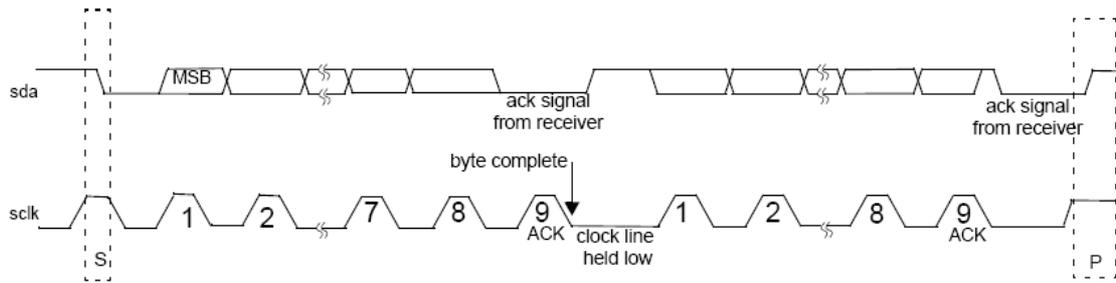


Figura 4.5. Formato serial de la trama de datos

Fuente: Kodak KAC-9618 CMOS Image – <http://www.kodak.com>

De las opciones mostradas anteriormente se elegirán los siguientes modos:

- Modo escáner progresivo, para leer de forma progresiva cada pixel de cada fila y columna.
- Integración total de los pixeles, para que cada pixel del cuadro integre de forma total la luz incidente.
- Modo monocromo y con ganancia, para captar también la región del infrarrojo cercano.
- Opción de video e imagen, para transmitir y decidir en qué momento se toma la imagen.
- Cantidad de bits: 12, para tener la máxima resolución por pixel.
- Cantidad de cuadros de imagen: 30 FPS, para la transmisión de video.

Para lo indicado se tienen que escribir en los siguientes registros que se mostrarán en la siguiente Tabla 4.1:

Tabla 4.1. Registros a programar en el sensor Kodak KAC-9618

REGISTRO	RESET	BIT0	BIT1	BIT2	BIT3	BIT4	BIT5	BIT6	BIT7	
MCFG0	00 HEX	Direcc. Pixel al green gain	Reservado	Conf. Corr. Pix. monocromo	Reservado	Desact. Comp. Nivel Oscur.	Activ. Correc. de pixeles	Power down el sensor	Indica si está listo para usar	
		1	R	1	R	0	1	0	0 (LECTURA)	
MCFG1	00 HEX	Reservado	Reservado	Modo esclavo	Reservado	Vertical sub sampling	Horizontal sub sampling	Modo de escaneo	Monocromo o color	
		R	R	1	R	0	0	0	1	
VCLKGEN	00 HEX	Divide la frecuencia del clock externo para generar el clock interno (Hclk)					Reservado	Divide la frecuencia del clock externo para Pump Clk		
		0	0	1	0	0	R	0	0	
VMODE0	00 HEX	Reservado	Reservado	Reservado	Reservado	Ruteo de A/D al puerto A/D[11:0] - >d[11:0] (00)		# de bits en la salida: 12 (00), 10(01), 8 (10).		
		R	R	R	R	R	0	0	0	
VMODE1	00 HEX	Triestado	Indic. par o impar campo	Polaridad del Vsync	Polaridad del Hsync	Polaridad clock del pixel	Modo Hsync	Modo Vsync	Modo del clock del pixel	
		0	0	0	0	0	0	0	0	
VMODE2	00 HEX	Reservado	Reservado	Reservado	Ajuste de Hsync, programa los clocks para el primer pixel válido . (00 HEX) 0 clocks hasta (0F HEX) 15 clocks.					
		R	R	R	1	0	0	0	0	
SNAPSHOTMODE	00 HEX	Activ. external snapshot	Polaridad del flanco	Modo snapshot	Reservado	Señal extsync (1) señal a 0	Modo shutter externo (1)	# frames antes de snapshots (01) 1 frame, ... , (11)3 frames		
		1	1	0	R	1	1	1	1	
SROWS	00 HEX	SwStartRow[1:8] Dirección de inicio de filas								
		0	0	0	0	0	0	0	0	
SROWE	FB HEX	SwEndRow[1:8] Dirección de fin de filas								
		1	1	0	1	1	1	1	1	

Tabla 4.1. Registros a programar en el sensor Kodak KAC-9618

RDELAYH	00 HEX	Los MSBs del retardo de columnas							
		0	0	0	R	R	R	R	R
RDELAYL	00 HEX	Los LSBs del retardo de columnas							
		0	0	0	0	0	0	0	0
FDELAYH	00 HEX	Los MSBs del retardo de los cuadros							
		0	0	0	0	R	R	R	R
FDELAYL	00 HEX	Los LSBs del retardo de los cuadros							
		1	0	0	1	0	0	0	0
DWLSB	32 HEX	SwStartRow [0]	SwEndRow [0]	DwCSL[0]	DwCSL[1]	DwCel [0]	DwCel [1]	SwLsb	Reservado
		0	1	0	0	1	1	0	R
GGAIN	00 HEX	Ganancia del color verde 0dB (00 HEX) hasta 14 dB (7F HEX)							
		1	1	1	1	1	1	0	0
ITIMEH	00 HEX	itime [11:8]				Reservado	Reservado	Reservado	Reservado
		1	1	1	0	R	R	R	R
ITIMEL	00 HEX	itime [7:0] Tiempo para la integración del arreglo							
		1	1	1	1	1	1	1	1

El diagrama de flujo para la configuración del sensor se muestra en la figura 4.6. Primero se lee el BIT7 del MCFG0 para saber si el sensor está listo para usarse. Luego se configura el MCFG1 para que el escaneo sea progresivo, es decir se toma en forma consecutiva cada píxel de cada fila y columna; y el color sea monocromo, para abarcar el rango del espectro de los 1000 nm.; luego se configura la ganancia y el tiempo del extsync. Después se programa el video en 30 FPS y por último se manda el registro UPDATE para actualizar las configuraciones.

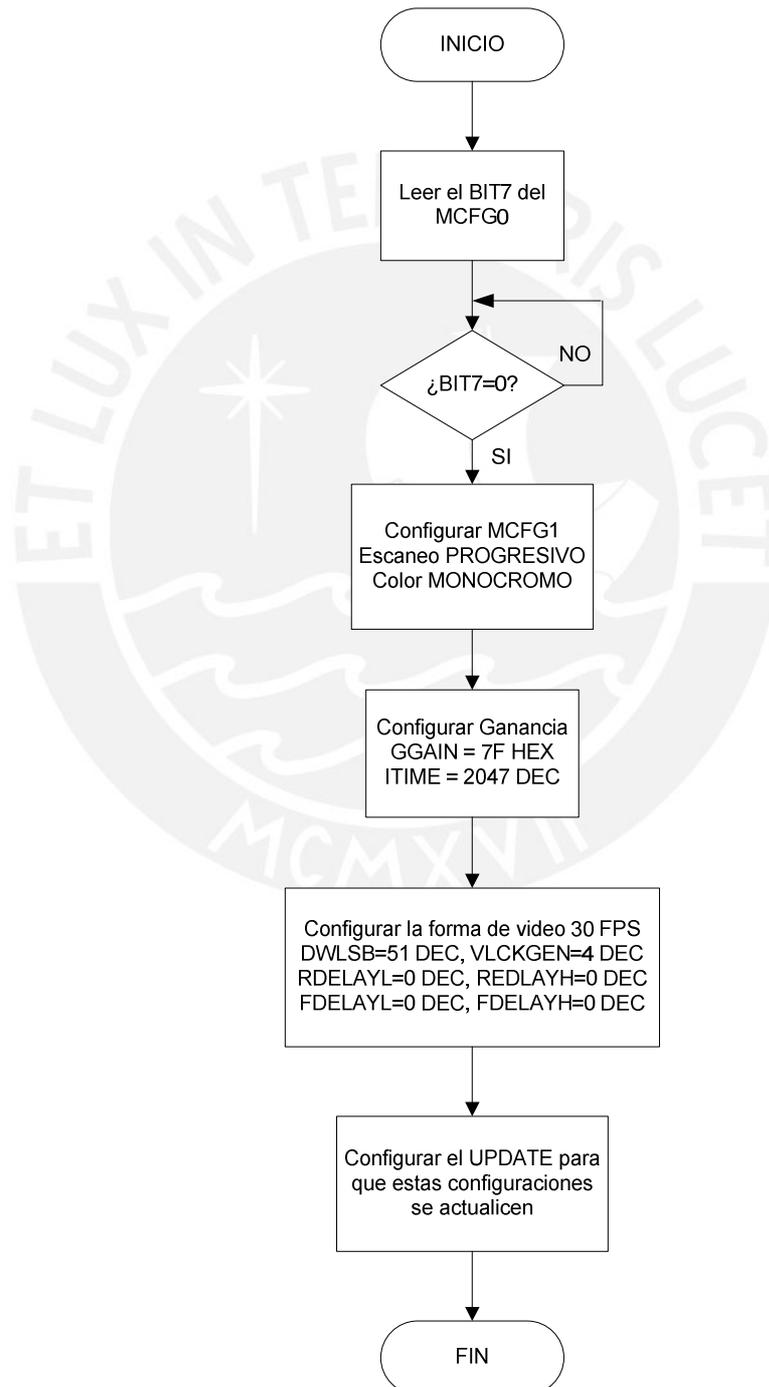


Figura 4.6. Diagrama de flujo para la configuración del sensor KAC-9618

Para tomar una imagen (Snapshot) el sensor debe estar operando en estado de VIDEO y cuando se reciba la indicación de tomar la imagen se debe habilitar un bit *SnapEnable* del registro SNAPSHOTMODE para que el sensor se quede congelado al final del actual cuadro. Se volverá a VIDEO deshabilitando el pin. Para mantenerse en el estado de SNAP hay una señal que se genera, TRIGGER, por la señal de Snapshot. Todo esto se muestra en la figura 4.7 Modo Snapshot.

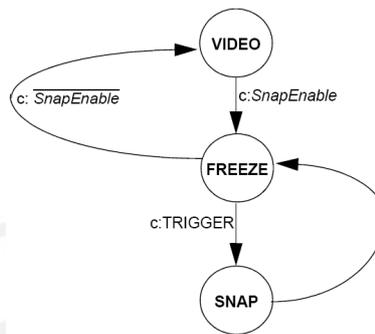


Figura 4.7. Diagrama de estados de modo Snapshot

Fuente: Hoja técnica KAC-9618 www.kodak.com

Se muestra a continuación en la figura 4.8 el diagrama de flujo del Snapshot.

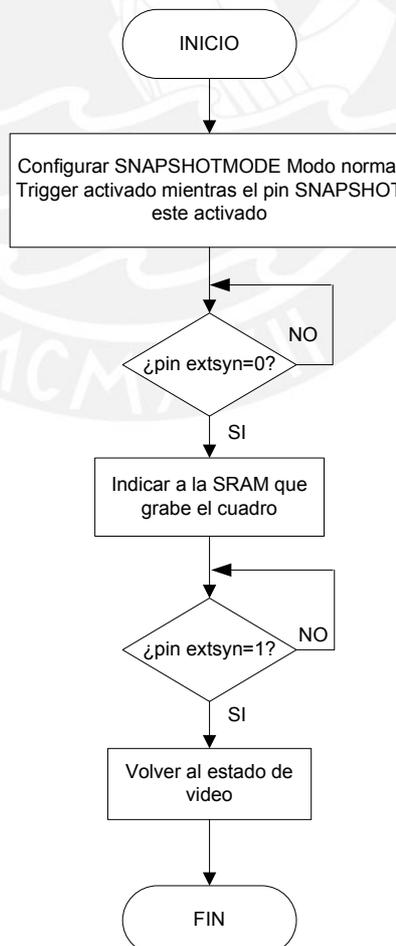


Figura 4.8. Diagrama de flujo del SNAPSHOT

En la figura 4.9 se muestra el diagrama esquemático del sensor KAC-9618

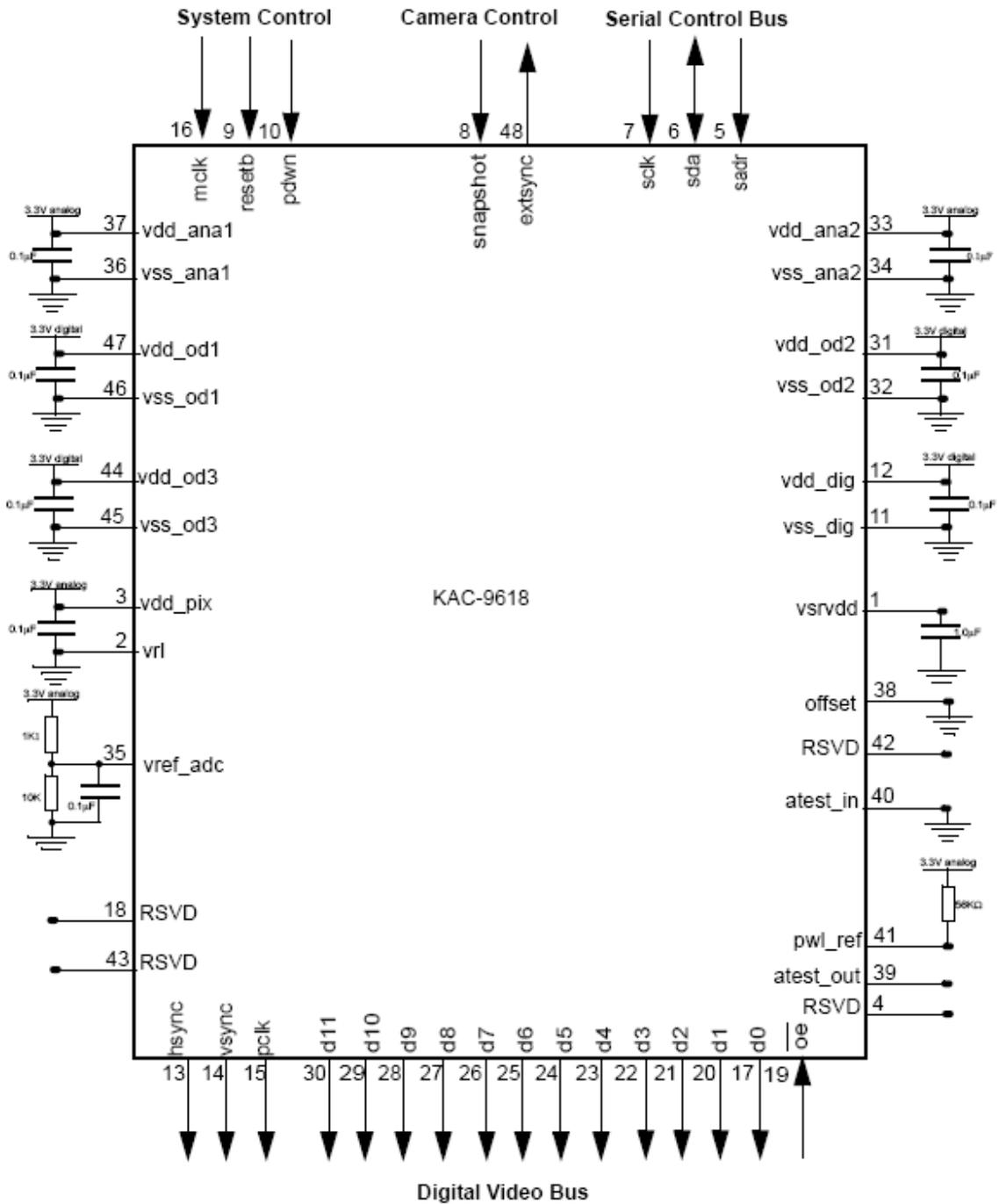


Figura 4.9. Diagrama esquemático del sensor KAC-9618[36]

Fuente: Hoja técnica KAC-9618 www.kodak.com

4.3. SRAM CY7C1061

La memoria SRAM que se utilizará es la CY7C1061AV33 [35] de tecnología CMOS que se organiza en 1 048 576 palabras de 16 bits. Se adjunta en el Anexo 3 la hoja de datos del dispositivo. En esta memoria se piensa almacenar temporalmente el cuadro de imagen. Por tal razón debemos conocer como se escribe en la memoria SRAM.

Para la escritura se realiza lo siguiente:

- Habilitar el chip ($CE_1=0$, $CE_2=1$).
- El pin de habilitar escritura $WE=0$.
- Se indica la dirección donde se grabará con $[A_0:A_{19}]$.
- Si el pin $\overline{BLE}=0$ se escribe lo que indica $[IO_0:IO_7]$.
- Si el pin $\overline{BHE}=0$ se escribe lo que indica $[IO_8:IO_{15}]$.

Y para la lectura se realiza lo siguiente:

- Habilitar el chip ($CE_1=0$, $CE_2=1$).
- EL pin de habilitar salida $OE=0$.
- El pin de habilitar escritura $WE=1$.
- Se indica la dirección de donde se leerá con $[A_0:A_{19}]$.
- Si el pin $\overline{BLE}=0$ en los pines $[IO_0:IO_7]$ se pondrá el valor leído.
- Si el pin $\overline{BHE}=0$ en los pines $[IO_8:IO_{15}]$ se pondrá el valor leído.

En la tabla 4.2 se muestra la tabla de verdad con todos los pines de control mencionados (CE_1 , CE_2 , WE , OE , \overline{BLE} , \overline{BHE}).

Tabla 4.2. Tabla de verdad con los pines de control

Truth Table

\overline{CE}_1	\overline{CE}_2	\overline{OE}	\overline{WE}	\overline{BLE}	\overline{BHE}	IO_0-IO_7	IO_8-IO_{15}	Mode	Power
H	X	X	X	X	X	High-Z	High-Z	Power Down	Standby (I_{SB})
X	L	X	X	X	X	High-Z	High-Z	Power Down	Standby (I_{SB})
L	H	L	H	L	L	Data Out	Data Out	Read All Bits	Active (I_{CC})
L	H	L	H	L	H	Data Out	High-Z	Read Lower Bits Only	Active (I_{CC})
L	H	L	H	H	L	High-Z	Data Out	Read Upper Bits Only	Active (I_{CC})
L	H	X	L	L	L	Data In	Data In	Write All Bits	Active (I_{CC})
L	H	X	L	L	H	Data In	High-Z	Write Lower Bits Only	Active (I_{CC})
L	H	X	L	H	L	High-Z	Data In	Write Upper Bits Only	Active (I_{CC})
L	H	H	H	X	X	High-Z	High-Z	Selected, Outputs Disabled	Active (I_{CC})

Fuente: Hoja técnica CY7C1061- <http://www.cypress.com>

Todos estos pines de control y los pines de dirección de la RAM serán controlados, valga la redundancia, por el micro – controlador LPC2106. Se presenta a continuación las formas de escritura y lectura controlando ciertos pines con la programación del LPC2106 [36].

Para la escritura de la información se realizará controlando el pin WE, para esto se muestra en la figura 4.10, el diagrama de tiempo que se debe tener en cuenta para capturar la información de los pines. El diagrama es para la adquisición de los 16 pines I/O, lo cual se realiza en 10 ns. Los pines tendrán los siguientes valores $CE_1=0$, $CE_2=1$ y $BHE/BLE=0$. Solamente se espera el valor correcto del pin WE ($WE=0$). Mientras no se tenga este valor los pines I/O serán como salidas.

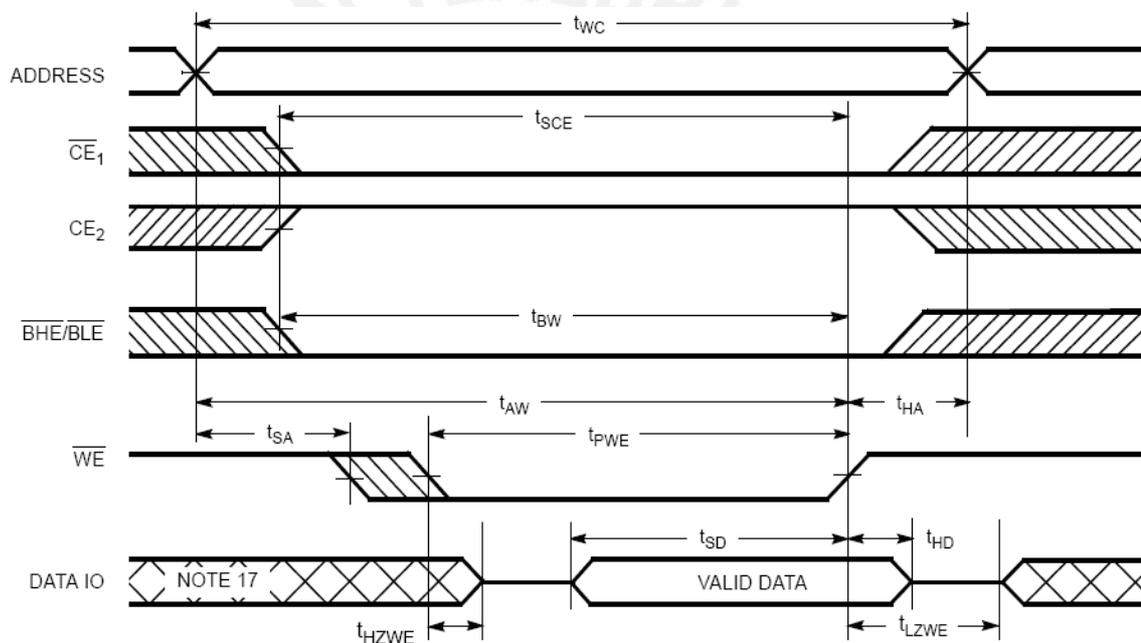


Figura 4.10. Diagrama de tiempos para la escritura controlando el pin WE.

Fuente: Hoja técnica CY7C1061- <http://www.cypress.com>

Para la lectura de los pines se realizará controlando el pin OE, al igual que la escritura se muestra el diagrama de tiempo que indica cómo debemos leer.

De similar manera se realiza para la operación de lectura. Para la lectura de la información se realizará controlando el pin OE, para esto se muestra en la figura 4.11; el diagrama de tiempo que indica cómo capturar la información de los pines. El diagrama es para la adquisición de los 16 pines I/O, lo cual se realiza en 10 ns. Los pines tendrán los siguientes valores $CE_1=0$, $CE_2=1$ y $BHE/BLE=0$. Solamente se

espera el valor correcto del pin OE ($OE=0$). Mientras no se tenga este valor los pines I/O serán como entradas y tendrán alta impedancia.

Read Cycle No. 2 (\overline{OE} Controlled) [13, 14]

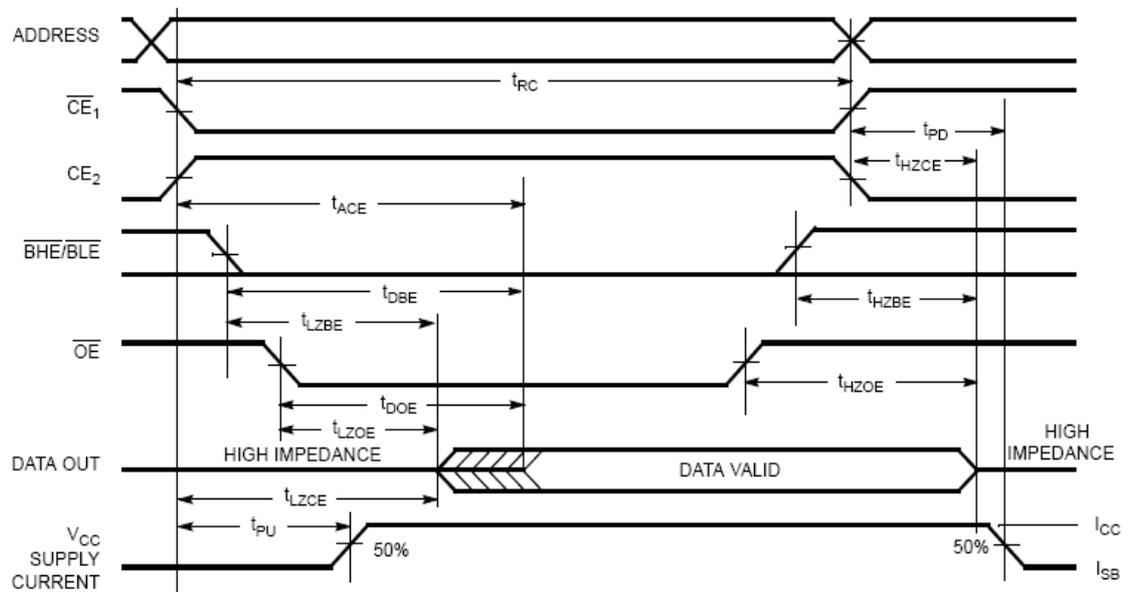


Figura 4.11. Diagrama de tiempos para la lectura controlando el pin OE

Fuente: Hoja técnica CY7C1061- <http://www.cypress.com>

Como tiene 20 pines para seleccionar la dirección de la memoria sería ineficiente seleccionar un nuevo micro controlador con más pines. Por tal razón se utilizarán dos contadores de 12 bit para así seleccionar todas las direcciones de memorias. El contador que se empleará es MM74HC4040 [37] de FAIRCHILD Semiconductor. Y para ambos contadores se utilizará como señal de reloj de entrada el pin pclk del sensor KAC-9618.

Esta memoria tendrá el siguiente diagrama esquemático como se muestra en la figura 4.12:

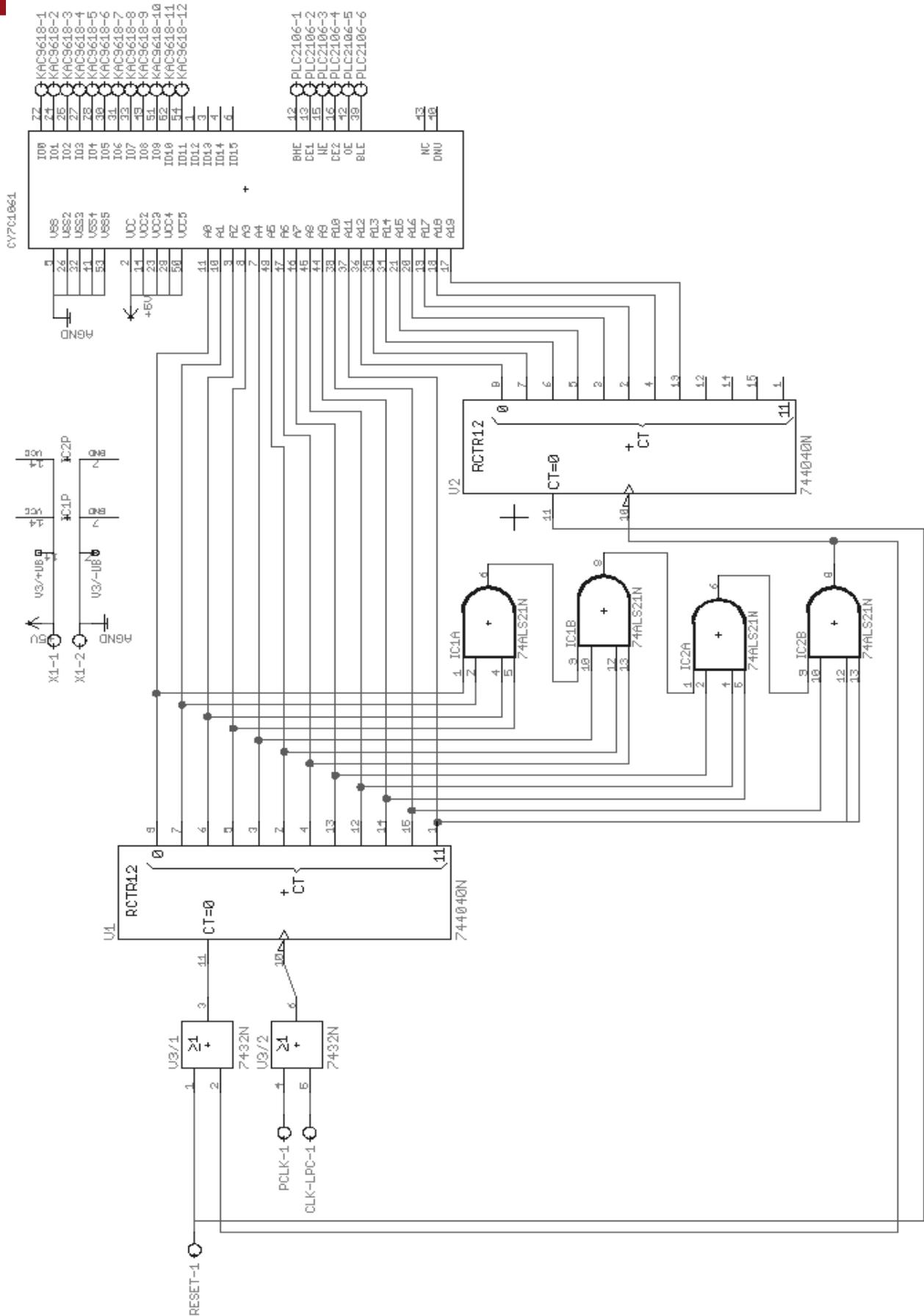


Figura 4.12. Diagrama esquemático propuesto para la memoria SRAM CY7C1061

4.4. Módulo DOSonCHIP [37] [38]

Como el módulo tiene tres interfaces, UART, SPI e I²C (que aún no está instalado según el fabricante). Se elige la interfaz SPI por un mejor entendimiento. El diagrama esquemático con la interfaz SPI es el que se muestra en la figura 4.13. El módulo será controlado a través del LPC2106.

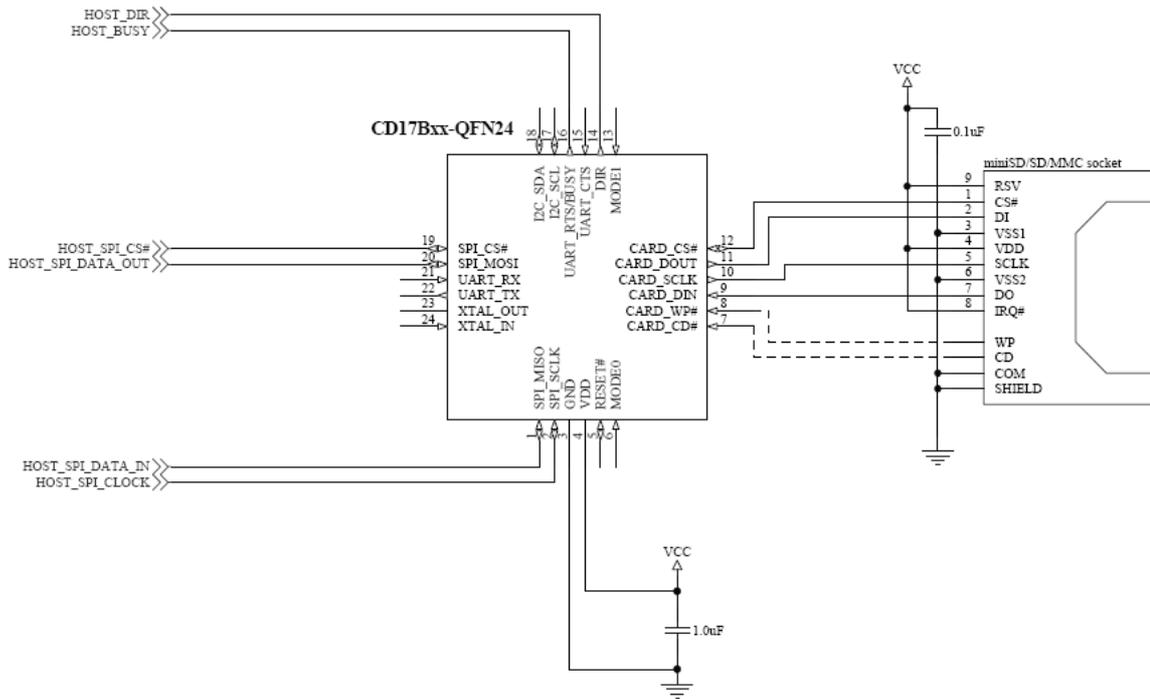


Figura 4.13. Diagrama esquemático del módulo DOSonCHIP - CD17B10

Fuente: CD17B10 User Guide – <http://www.dosonchip.com>

La hoja de datos muestra los comandos para ingresar, modificar, leer y eliminar archivos. Ponemos un ejemplo para entender cómo debemos enviar la información:

```

>ow IMAGEN.TXT ; <-- abrimos o creamos un nuevo archivo para grabar.
1 ; --> DOSonCHIP regresa un número de archivo para grabar.
>w #1 8 ; <-- escribimos 8 bytes en el archivo #1.
" ; --> ", es la cabecera para el envío de datos
ABCDEFGH ; <-- byte stream...
" ; --> " De DOSonCHIP, para confirmar que se ha enviado los
bytes.
>q ; <-- Cerramos todos los archivos abiertos.
    
```

Se adjunta la hoja de datos del dispositivo en el Anexo 5.

4.5. Micro-controlador LPC2106 [36]

El micro controlador elegido es el encargado de manejar a todos los dispositivos y recibirá a través del pin TOMAFOTO el valor respectivo para la toma de la imagen y almacenarla. El micro controlador tendrá el siguiente diagrama esquemático como se muestra en la figura 4.14.

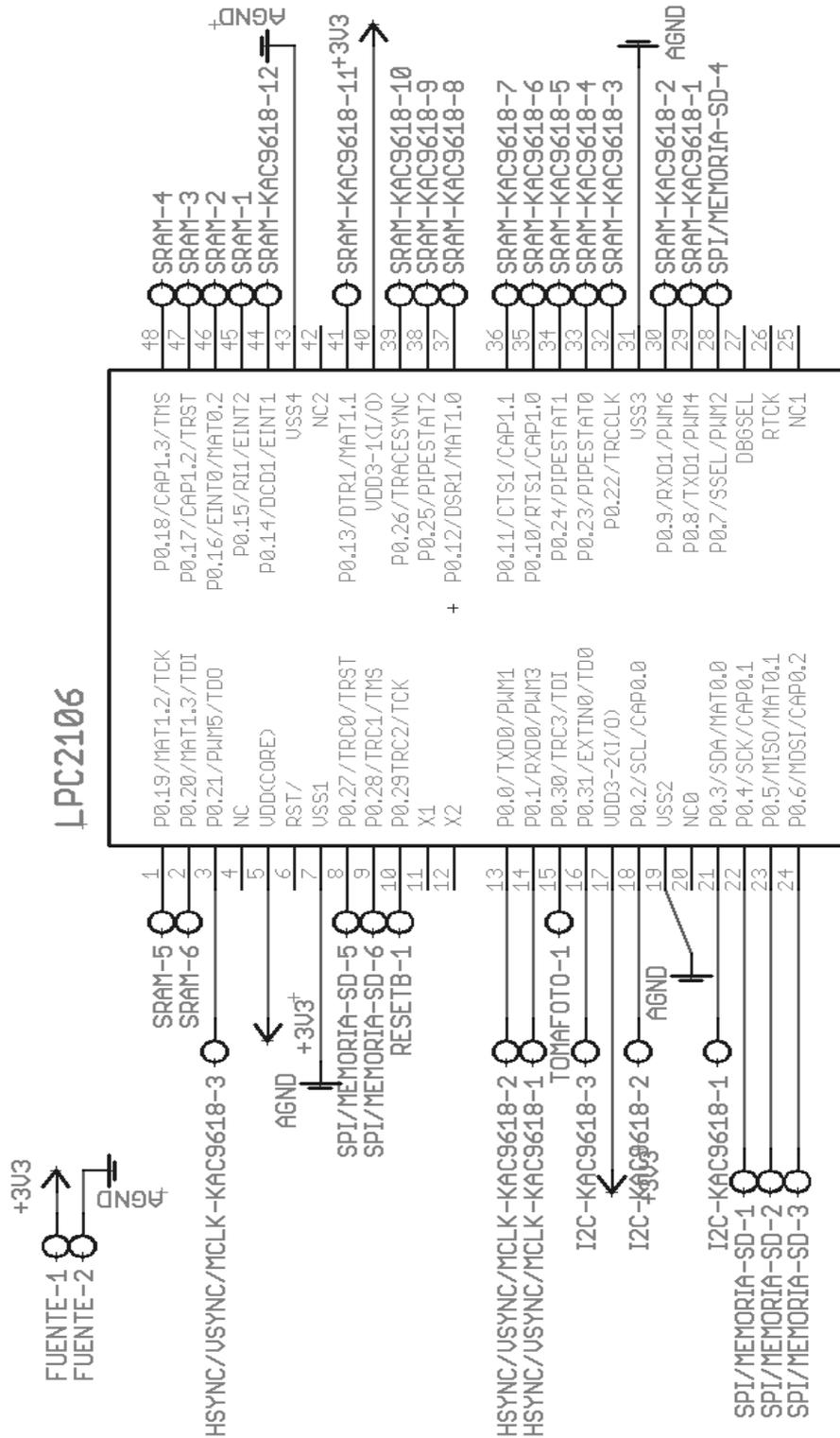


Figura 4.14. Diagrama esquemático propuesto para el micro controlador LPC2106

El micro controlador tendrá el siguiente diagrama de flujo mostrado en la figura 4.15:

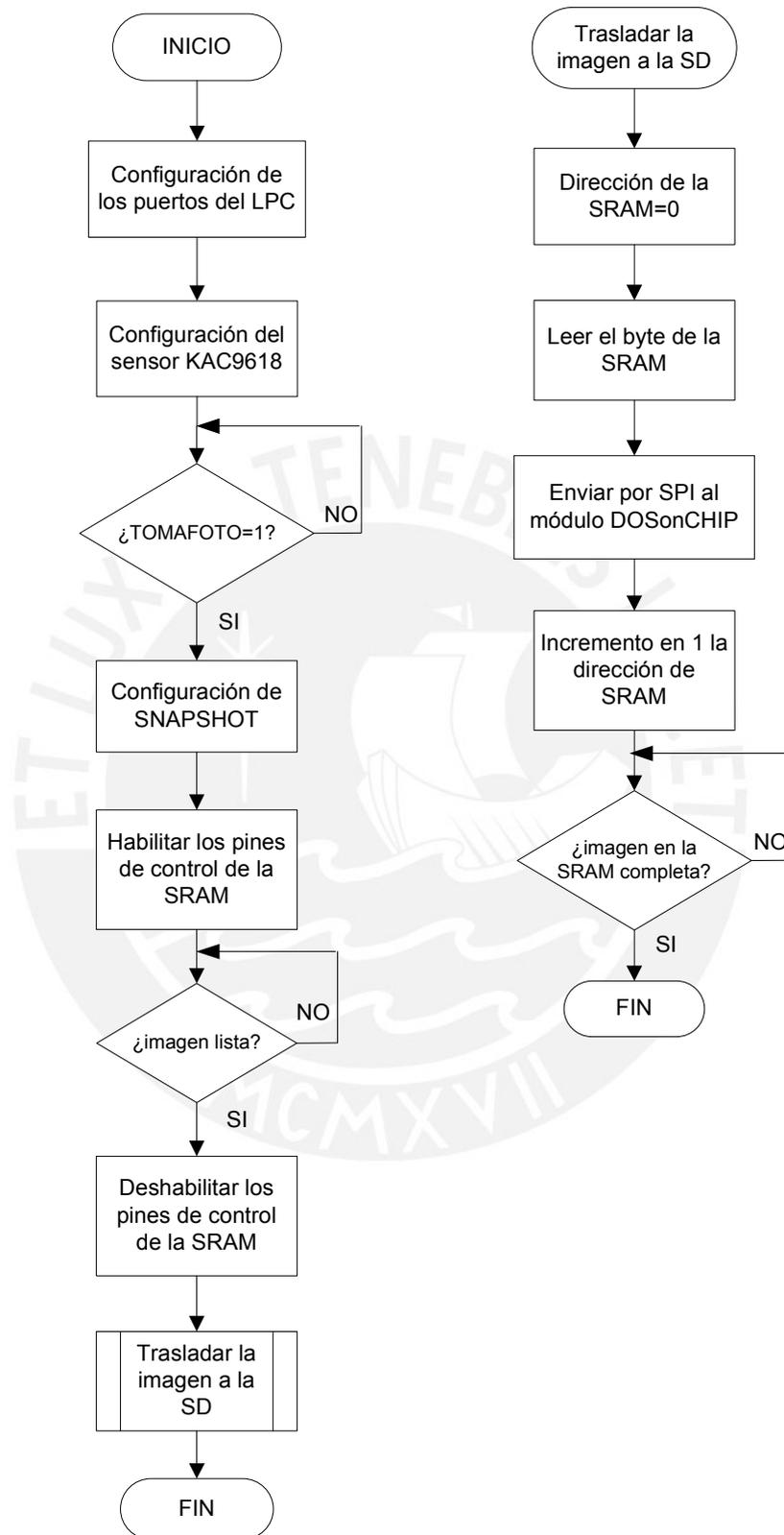


Figura 4.15. Diagrama de flujo del micro controlador LPC2106

Se adjunta la hoja de especificaciones del dispositivo en el Anexo 4.

4.6. Análisis de factores

El análisis de los factores ya mencionado en el capítulo 3 es muy importante pues permite saber si el diseño propuesto es el indicado y si es viable su desarrollo. Estos factores son el precio, el consumo de corriente, el tamaño, el tiempo y el peso.

4.6.1. Análisis de tiempo

El primer factor es el tiempo, actualmente las cámaras Dycam [38] y Tetracam [39] demoran 20 y 12 segundos en tomar una imagen y estar listos para la siguiente imagen. Se calcula a continuación los tiempos de cada dispositivo.

El sensor KAC-9618 trabajará en el modo esclavo ya que será controlado por el micro controlador LPC2106, por lo tanto la frecuencia de funcionamiento estará determinada por el LPC2106. La frecuencia se utilizará $mclk = 48\text{MHz}$.

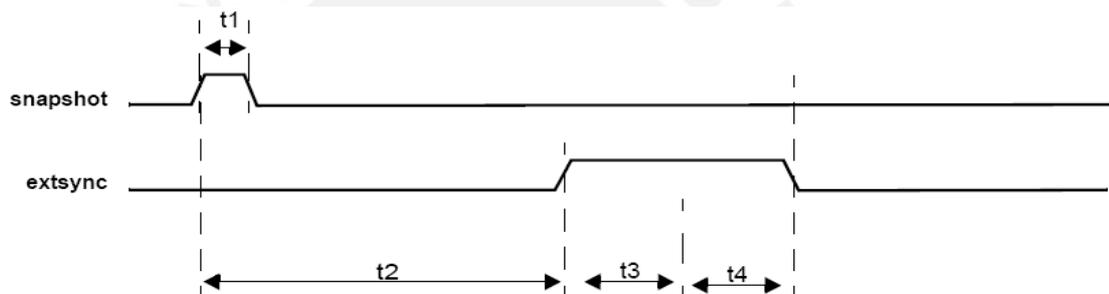


Figura 4.16. Diagrama de tiempos para Snapshot en el sensor KAC-9618

Fuente: Kodak KAC-9618 CMOS Image – <http://www.kodak.com>

Tiempo de $Hclk = mclk / 6 = 83.33\text{ns}$.

Ciclo de operación para la lectura de una fila = $780 * 83.33 \text{ ns} = 65 \text{ us}$.

$FN_{Hclk} = (648+9)*65\text{us} = 42.705 \text{ ms}$.

$t2 = \text{Array Reset} = 3 \text{ frames} * 42.705 \text{ ms} = 128.115 \text{ ms}$.

$t1 = \text{Tiempo de Snapshot} = 2 * mclk = 41.67 \text{ ns}$.

$t3 + t4 = \text{Tiempo del extsync} = 2 * FN_{Hclk} = 85.410 \text{ ms}$.

La suma total = Tiempo de Snapshot + Tiempo de Array Reset + Tiempo del extsync
= 213.525 ms.

Falta la programación del modo de video a modo snapshot y viceversa, la cual tiene la siguiente suma de tiempos. Son 8 bits por 4 registros que se envíen en la escritura, los tiempos de esperas de los ACK: $((8 * 1.9\text{us} * 4 + 0.6\text{us} * 2 + 1.9\text{us} * 4) * 2) * 2 = 2.2272 \text{ ms}$.

Entonces la suma total será: **216 ms**.

Se almacenarán 648*488 pixeles de 12 bis en las direcciones de la RAM. Si el tiempo para el ingreso de los 12 bits es 10ns. Entonces en el ingreso de todos los pixeles a la RAM demoraría 3.16224 ms. Pero el sensor KAC-9618 se demora aproximadamente 85.410 ms. Por lo tanto para la escritura se demorará 85.410 ms. Pero para la lectura si serán los 10 ns y eso da 3.16224 ms. En total sumarán **88.57224 ms**.

El programa escrito en el micro.controlador LPC2106 cuenta con 140 instrucciones para acceder al sensor, en la lectura de los pixeles de la RAM y su almacenamiento en el módulo además el dispositivo trabaja a 60 MHz. Por lo cual tendremos lo siguiente:

$$140 \times (1/60\text{MHz}) \times 2 \times 648 \times 488 = \mathbf{1.475712 \text{ s}}$$

El módulo DOSonCHIP utiliza la frecuencia de 1.5MHz. Como se utiliza la interfaz SPI, la cual envía 8 bits, la hoja técnica muestra los tiempos de estos datos. Estos son los siguientes: $T_{ck} = 1/1.5\text{MHz} = 666.67 \text{ ns}$.

$$\text{Tiempo de los 8 bits de } T_x = 8 \times 666.67 \text{ ns} = 5.33 \text{ us}$$

Como son 12 bits serán 2 bytes que se transmitirán y son 316 224 pixeles:

$$\text{Tiempo total} = 5.33 \text{ us} \times 2 \times 316 \ 224 = \mathbf{3.37095851 \text{ s}}$$

El tiempo total para la adquisición de imagen, el almacenamiento temporal en la RAM y el almacenamiento en el módulo DOSonCHIP es:

$$3.37 + 1.48 + 0.08857 + 0.216 = \mathbf{5.15 \text{ s}}$$

4.6.2. Análisis de consumo de potencia

El presente diseño estará colocado sobre una aeronave e interactuará con los dispositivos de control de la aeronave, por lo cual el consumo de corriente es muy importante para determinar qué tipo de batería comprar y por cuánto tiempo permanecerá en el aire. A continuación se muestra los consumos de corriente en cada dispositivo en la tabla 4.3:

Tabla 4.3. Consumo de corriente de los dispositivos

Dispositivos	Corriente	Voltaje
Sensor KAC-9618	50 mA	3.3 V
uC LPC2106	100 mA	1.65- 1.95 V
SRAM CY7C1061	50 mA	3.3 V
Módulo CD17B10	5 mA	2.7 – 3.3V
Contador MM74HC40(x2)	200 mA	2 – 6 V
Total	405 mA	-

4.6.3. Análisis de costo

Actualmente las cámaras multispectrales tienen un alto costo, por encima de los US\$5 000 en Estados Unidos y Canadá [38] [39] [40] [41]. El presente diseño tienen los siguientes precios:

El módulo DOSonCHIP CD17B10 será adquirido del mismo fabricante DOSonCHIP. Todos los demás dispositivos serán adquiridos en el distribuidor Digikey [42]. Los dispositivos tienen los siguientes precios:

Tabla 4.4. Precios de los componentes del diseño

ITEM	Descripción	Precio Unitario (US\$)	Cantidad a pedir	Total-Tarjeta
IC SENSOR IMAGE VGA MONO 48-CLCC	Sensor de Imagen KODAK	25	1	25
CAP CERAMIC 39PF 50V NP0 1206	Capacitor 39pF	0.108	10	1.08
CRYSTAL 14.7456 MHZ 20PF 49US	Cristal 14.7456 Mhz	0.58	1	0.58
IC SRAM 4MB ASYNC 44-TSOP	Memoria SRAM	5.1	2	10.2
IC ARM7 MCU FLASH 128K 48-LQFP	Microcontroller LPC2106 ARM	12.5	1	12.5
IC 12BIT BIN RIPPL COUNTER 16DIP	Contador 12 bits	0.5	1	0.5
CAP .10UF 50V CERAMIC X7R 1210	Capacitor 100nF	0.363	10	3.63
RES 10K OHM 1/4W 5% 1210 SMD	Resistor 10K	0.27	10	2.7
RES 1.10K OHM 1/4W 1% 1210 SMD	Resistor 1.1K	0.378	10	3.78
RES 0.0 OHM 1/4W 5% 1206 SMD	Resistor 0K	0.04	10	0.4
IC REG LDO 800MA 3.3V SOT-223	Regulador de Voltaje 3.3V	1.31	2	2.62
IC REG LDO 800MA 1.8V SOT-223	Regulador de Voltaje 1.8V	1.31	1	1.31
CAP TANT 100UF 10V 10% LOESR SMD	Capacitor Tantalio 100uf	1.426	10	14.26
CAP TANT 10UF 35V 10% LOESR SMD	Capacitor Tantalio 10uf	1.569	10	15.69
IC TXRX RS232 1MBPS LP 16-SOIC	MAX3232	4.19	1	4.19
IC SRAM 16MB ASYNC 54-TSOP	Memoria SRAM	29.7	1	29.7
IC 8-BIT BINARY COUNTER 16-DIP	Contador 8 bits	0.66	2	1.32
MÓDULO DOSonCHIP – CD17B10	Grabador de memorias SD	44.95	1	44.95

La suma total de todos los componentes es **US\$ 174.41** sin incluir gastos de envío e impuestos. Incluyendo los gastos de envío e impuestos el costo sería **US\$ 400.00**.

Adicionalmente se tienen que sumar los costos por la realización de las tarjetas electrónicas que tiene un costo aproximado de:

Fibra de vidrio doble cara S/. 0.45 x cm².

Fibra de vidrio una cara S/. 0.30 x cm².

Asumiendo que las tarjetas sean de 10 x 10 cm., y lo hacemos a doble capa y salen 3 tarjetas (Sensor KAC-9618, SRAM, LPC2106). Saldría una suma total de:

$$0.45 \times 10 \times 3 = \text{S/}. 13.50.$$

Este precio lo pasamos a dólares americanos con cambio S/. 2.95 (25/06/2008) saldría **US\$ 4.58**.

Falta añadir el precio de las horas-hombres, el alquiler de los equipos, local, consumo de energía, pruebas, experiencia del diseñador, etc. Es un cálculo bien difícil de realizar así que se dará un aproximado. Para un tiempo de 3 meses de trabajo a 4 horas diarias resultará un precio de **US\$ 300**.

En resumen el costo de la implementación de la cámara será el resultado de:

$$400 + 4.58 + 300 = \text{US\$ } 704.58.$$

Como se necesita adquirir el espectro visible y del infrarrojo cercano el costo se multiplica por dos.

$$704.58 \times 2 = \text{US\$ } 1409.16$$

A este costo se le debe sumar el costo del diseño propuesto y este tiene un costo de **\$400.00**.

$$1409.16 + 400 = \text{US\$ } 1809.16$$

4.6.4. Análisis de peso

Los dispositivos tienen los siguientes pesos:

Sensor KAC-9618	1.64 g
uC LPC2106	0.24 g
SRAM CY7C1061	0.30 g.
Módulo CD17B10	no indicado.
Contador MM74HC40	0.30 g.

Como vemos el peso total del diseño no excederá los 100 g.

4.6.5. Análisis de tamaño

Los dispositivos tienen los siguientes tamaños:

Tabla 4.5. Dimensiones de los dispositivos

Dispositivos	Horizontal (mm.)	Vertical (mm.)	Grosor (mm.)
Sensor KAC-9618	14.5	14.5	0.2580
uC LPC2106	7	7	1.6
SRAM CY7C1061	22.517	11.938	1.20
DOSonCHIP	1195.2	1265.9	900
Contador MM74HC40	19.81	6.604	8.890

CONCLUSIONES

1. Las alternativas de diseños propuestas son viables en su construcción pues solucionan las principales limitaciones de las cámaras multiespectrales como su poca capacidad de almacenamiento, su autonomía, el costo, entre otros.
2. El diseño elegido de entre todas las alternativas es el que cumple todos los requerimientos que se plantearon al inicio. Además el diseño elegido es viable para su construcción.
3. El diseño tiene un costo bajo, de 2 a 3 veces menos que el precio de las cámaras multiespectrales que actualmente se comercializan, como la Dycam, la Tetracam, etc.
4. El diseño tiene un reducido tiempo de adquisición de la imagen. Alrededor de 6 segundos. Este tiempo también es de 2 a 3 veces menor que las cámaras multiespectrales actuales como la TetraCam [39] o la Dycam [38]. Recalcando que el tiempo se obtuvo a un bajo costo.
5. El diseño final pesaría alrededor de 100 gramos. El peso influye de manera muy determinante pues el diseño se montará sobre una aeronave que volará a más de 100 metros de altura. Además este diseño no será el único montado sobre la aeronave, por ende se busca tener el menor peso posible. El diseño de la aeronave depende del peso.
6. El diseño tendría un alto consumo de corriente, alrededor de 405 mA, de los cuales 200 mA se deben a los dispositivos para guardar la imagen en la SRAM CY7C1061. El consumo de corriente es vital pues existirán motores y otras tarjetas electrónicas y todos estos dispositivos estará alimentado por una batería. Este consumo de corriente reducirá el tiempo que durará la batería durante el vuelo.

7. El diseño se estima que tendrá un tamaño pequeño, pues los dispositivos que se van a utilizar son muy pequeños de alrededor de 2 cm x 2 cm. Por ende las tarjetas que se obtendrán saldrán pequeñas, pues no se necesitan muchos más dispositivos adicionales.
8. El diseño podrá emplear dispositivos de almacenamiento como memorias SD, micro SD, entre otros. En el diseño se utilizará un módulo de almacenamiento para almacenar una mayor cantidad de imágenes. Así que se almacenará más imágenes en un solo vuelo de la aeronave.
9. El diseño también permite movilidad y compatibilidad al ser tarjetas pequeñas. Esto ayuda a que se adecue a cualquier aeronave.



RECOMENDACIONES

1. Para que las tarjetas sean más pequeñas se deben realizar tarjetas a doble capa y que todos los elementos utilizados sean removibles y de fácil cambio.
2. Las imágenes tienen una resolución de 648 x 488, por ende la altura a la que se toma la imagen será determinada por las pruebas. Con esto no se critica al diseño, pues la cámara Dycam tiene una resolución menor que el diseño actual y se tomaron fotografías a 100 metros de distancia y se obtuvieron muy buenas fotos. Sólo sería una corroboración del buen funcionamiento y poder determinar el mejor diseño óptico para la cámara. Adicionalmente se propone que el diseño óptico sea regulable de 100 a 500 metros, y si se puede que tenga la opción de zoom.
3. Buscar elementos contadores con un menor consumo de corriente para reducir el consumo de corriente actual del diseño.
4. Proteger el diseño cuando se monte sobre la aeronave para evitar que se afecte su funcionamiento, inclusión de ruido y vibraciones.

FUENTES

- [1] J. Pickle, "Making NDVI Images using the Sony F717 "Nightshot" Digital Camera and IR Filters and Software Created for interpreting Digital Images", *Measuring Vegetation Health*, Octubre 2004 [consultado 2007/09/20].
<http://mvh.sr.unh.edu/software/guides/NDVIfromDigitalCamera.pdf>
- [2] D. Bradley, S. Thayer, A. Stentz and P. Rander, "Vegetation Detection for Mobile Robot." Robotics Institute, Carnegie Mellon University. Pittsburgh, PA. Febrero. 2004 [consultado 2007/09/18] http://www.ri.cmu.edu/pubs/pub_5287.html
- [3] P. Carrasco, E. Camargo, B. Theodor and J. Moreira, "Aplicaciones agrícolas y forestales de las bandas 3 y 4 del sensor CCD en combinación con la banda 2 del sensor IR-MSS del satélite CBERS." *Coordinación General de Observación de la Tierra – OBT*. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Brasil. 2005
http://www.obt.inpe.br/cbers/cbers_XIISBSR/641_Pereira_et_al_SBSR_2005.pdf
- [4] D. Litwiller, "CMOS vs. CCD: Maturing Technologies, Maturing Markets." *Photonics Spectra*. Laurin Publishing. DALSA Technology with vision. 2005
http://www.dalsa.com/shared/content/pdfs/CCD_vs_CMOS_Litwiller_2005.pdf
- [5] Dave Litwiller, "CCD vs. CMOS: Facts and Fiction." *Photonics Spectra*. Laurin Publishing. DALSA Technology with vision. 2001
http://www.dalsa.com/shared/content/Photonics_Spectra_CCDvsCMOS_Litwiller.pdf
- [6] CALMIT (Center for Advance Land Management Information Technologies), "The Nebraska Airbone Remote Sensing Facility". 2002
http://www.lars.purdue.edu/seminar/presentations/2002_Seminar10.pdf >
- [7] J. Néstor, "Tecnología de análisis de granos por infrarrojo (NIRS) y su rol en la agricultura de precisión". *7º Curso de Agricultura de Precisión y 2º Expo de Máquinas Precisas*. Proyecto Nacional Agricultura de Precisión. Manfredi, Córdoba. Argentina. Page(s) 127-137. 2007
<http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/7moCursoAgPrec.asp>
- [8] Gerald C. Holst, "CCD Arrays Cameras and Displays." 2da Edición. Bellingham (Washington): JCD Publishing. 1998

- [9] E. Chuvieco, "Fundamentos de Teledetección espacial". 3era Edición revisada. Fuenlabra (Madrid): Ediciones RIALP. 2000.
- [10] F. Sabins, "Remote sensing: principles and interpretation". New York: W.H. Freeman, 1997
- [11] L. Brissot, J. Chautemps, "Sensores de imagen CMOS y CCD Comparación". *Mundo Electrónico*. Febrero (361): 30-34. 2005
- [12] Ministerio de Agricultura del Perú, "Cultivo de Importancia Nacional: Papa." Ministerio de Agricultura del Perú. 2007.
http://www.minag.gob.pe/agricola/papa_ficha.shtml
- [13] C. Crissman, C and CIP, "Research / Improved potato technologies." International Potato Center (CIP).pp.2. 2004
<http://www.cipotato.org/publications/publication.asp?cod=002584>
- [14] P. Zorogastúa, R. Quiroz, M. Potts, S. Namanda, V. Mares and L. Claessens, "Utilization of high-resolution satellite images to improve the statistics of sweet potato cultivated area in the district of Kumi in Uganda." *Research investigations of CIP*. pp. 14, 2007.
- [15] J.Y. Hardeberg, F. Schmitt, H. Brettel, J.P. Crettez y H. Maître, "Multispectral Image Acquisition and Simulation of Illuminant Changes", en L.W. MacDonald y M.R. Luo (eds.), *Colour Imaging: Vision and Technology*, John Wiley and Sons, New York (1999).
- [16] Francisco H. Imai, Shuxue Quan, Mitchell R. Rosen and Roy S. Berns, *Digital Camera Filter Design for Colorimetric and Spectral Accuracy*, Proc. 3 International Conference on Multispectral Color Science, 13-16 (2001).
- [17] H.H. Szu, M. Vetterli, W.J. Campbell, J.R. Buss, "Imaging Spectroscopy Using Tunable Filters: A Review." *Wavelet Applications VII*. The International Society for Optical Engineering. Vol. 4056, pp. 50-64. 2000.
- [18] FAO, "Año Internacional de la PAPA 2008". <http://www.potato2008.org/es/>
[Consultado 25/11/07]
- [19] Philips, *Data Sheet of TDA8783 40 Msps, 10-bit analog-to-digital interface for CCD cameras*. Philips Semiconductors. 2003.

- [20] Hitachi, *BE-IR20 / 21 Infrared B/W Camera Module Operation Guide*. Hitachi Kokusai Electric Inc. 2000
http://www.hitachidenshi.com/supportingdocs/products/industrial_video_systems/machine_vision/BE1R_20_21_30_31_BORCHURE.pdf
- [21] Hamamatsu, “S9737-01 image sensor” en *CCD area image sensor S9737 series*. Hamamatsu Photonics K.K., Solid State Division. 2005.
http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/S9737_series.pdf
- [22] Analog Devices, *Multiformat SDTV video Decoder ADV7181B*, Norwood, USA: Analog Devices Inc. 2005.
http://www.analog.com/en/prod/0,,760_793_ADV7181B,00.html
- [23] Analog Devices, *10-Bit, 4xOversampling SDTV Video Decoder ADV7180*, Norwood, USA: Analog Devices Inc. 2005.
http://www.analog.com/en/prod/0,,765_793_ADV7180,00.html
- [24] Altera, “Cyclone II EP2C35F672C6” en *Cyclone II Device Family Datasheet*, Altera Corporation, Febrero 2008.
<http://www.altera.com/products/devices/cyclone2/cy2-index.jsp>
- [25] A. Rosado, “Circuito Programables FPGA: fundamentos básicos” en *Mundo Electrónico*. Num. 257. Barcelona, Madrid. Mayo 1995.
- [26] Carnegie Mellon University, “CMUCam3 Datasheet” en *Embedded Vision Processor CMUCam3*, Setiembre 2007.
http://www.cmucam.org/attachment/wiki/Documentation/CMUcam3_datasheet.pdf?format=raw
- [27] Omnivision, *OV6620 SINGLE-CHIP CMOS CIF COLOR DIGITAL CAMERA*, Omnivision Technologies Inc.: USA, Mayo 2000.
<http://www.cmucam.org/attachment/wiki/Documentation/OV6620.PDF>
- [28] Omnivision, *OV7620 SINGLE-CHIP CMOS VGA COLOR DIGITAL CAMERA*, Omnivision Technologies Inc.: USA, Mayo 2000.
<http://www.cmucam.org/attachment/wiki/Documentation/OV7620.pdf>
- [29] Jameco, “Video accessories - Transmitters” *Security Products*, USA 2008
<http://www.jameco.com/webapp/wcs/stores/servlet/CategoryDisplay?storeId=10001&catalogId=10001&langId=-1&categoryId=551505>
- [30] DOSonCHIP, *Embedded File Systems in Silicon*. Wearable Inc. 2006
<http://www.dosonchip.com/modules.htm>

- [31] OEMcameras.com, *RHPC 2005 Datasheet*, USA, 2008
http://oemcameras.com/products/boardcameras/hq_series/rhpc_2000_2005.php
- [32] Kodak, *Device Performance Specification Kodak KAC-9618 CMOS IMAGE SENSOR*. KODAK. Setiembre 2004. Revisión 2.0 <http://www.kodak.com/go/imagers>
- [33] Cypress Perform, *CY7C1061AV33 16Mbit (1M x 16) Static RAM*. Cypress Semiconductor Corporation. San José, CA. 26 Marzo 2007. <http://www.cypress.com>
- [34] Philips, *LPC2106/2105/2104 USER MANUAL*. Philips Semiconductors. 12 Setiembre 2003. <http://www.nxp.com/#/homepage>
- [35] DosonChip, *CD17B10 USER GUIDE*. Wearable.Com Inc. Revisión 0.1. Año 2006.
<http://www.dosonchip.com>
- [36] DosonChip, *CD17Bxx Memory Card Interface with File System*. Wearable.Com Inc. Revisión 1.1. Abril 2008. <http://www.dosonchip.com>
- [37] Fairchild, *MM74HC4040 12 Stage Binary Counter*. Fairchild Semiconductor Corporation. Revisado Diciembre 2003 <http://www.fairchildsemi.com>
- [38] Dycam Inc. Agricultural Digital Camera (ADC). Woodland hills, CA 91364.
Página web: <http://www.dycam.com/agri.html>
- [39] Tetracam Inc. Agricultural Digital Camera Tetracam Chatsworth CA 91311.
Página web: <http://www.tetracam.com/>
- [40] CropCam. Stony Mountain, Manitoba, Canadá. R0C 3A0.
Página web: <http://www.cropcam.com/index.htm>
- [41] OSKI, Opto-Knowledge Systems Inc. Torrance, CA 90502-1341.
Página web: <http://www.techexpo.com/WWW/opto-knowledge/index.html>
- [42] Digi-key Corporation – USA Home Page. USA.
Página web: <http://www.digikey.com/>