

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN ROBOT SEGUIDOR DE LINEA GUIADO
POR LOS VALORES DE PÍXELES DE LA IMAGEN EN UNA CAMARA
CONECTADA A UNA FPGA**

Larry Andrés Pérez Sánchez



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2015**

**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN ROBOT SEGUIDOR DE LINEA GUIADO
POR LOS VALORES DE PIXELES DE LA IMAGEN EN UNA CAMARA
CONECTADA A UNA FPGA**

Proyecto de Grado

Larry Andrés Pérez Sánchez

**DIRECTORES DEL PROYECTO
MSC. Cesar Augusto Aceros Moreno
Ing. Holguer Andrés Becerra Daza**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2015**

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Junio 11 de 2015

A MI MADRE Y HERMANOS

AGRADECIMIENTOS

A Dios todopoderoso que a diario nos concede sus bendiciones y nos permite alcanzar nuestras metas.

A mi hermano y mi madre, que con su apoyo incondicional brindaron las fuerzas necesarias para cumplir cada uno de mis objetivos.

Al personal docente, Ingeniero Alex, Ingeniero Cesar, Ingeniero Holguer, y demás personas, que con sus conocimientos y virtudes contribuyeron en mi formación profesional.

A esas personas que a lo largo de mi camino les he aprendido a conocer, con los que compartimos muchas experiencias y contare siempre con su amistad.

Gracias a todos aquellos que algún día me brindaron un consejo, una ayuda, un impulso y contribuyeron en mi crecimiento intelectual y profesional.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
2.1. DEFINICION DEL PROBLEMA.....	15
2.2. OBJETIVOS	16
2.2.1. General	16
2.2.2. Específicos.....	16
2.3. JUSTIFICACION.....	17
3. MARCO TEÓRICO.....	18
3.1. ROBOT SEGUIDOR DE LINEA.....	18
3.1.1. Estructura.....	18
3.1.1.1. SENSORES.....	18
3.1.1.2. MOTORES DC.....	19
3.1.1.3. RUEDAS.....	19
3.1.1.4. FUENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	19
3.1.1.5. BASE DE MONTAJE	19
3.1.1.6. TARJETA DE CONTROL.....	19
3.2. DISPOSITIVOS USADOS.....	19
3.2.1. FPGA CYCLONE IV.....	19
3.2.2. CAMARA DIGITAL.....	20
3.2.3. PANTALLA LCD.....	20
3.2.4. PLATAFORMA ROBOTICA.....	21
3.2.5. PUENTE H.....	22
4. PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA.....	22
4.1. SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS.....	22
4.1.1. TARJETA FPGA DE0-NANO.....	22
4.1.2. CAMARA TRDB-D5M	25
4.1.3. PANTALLA TRDB-LTM.....	26
4.1.4. PUENTE H.....	27
4.1.5. SENSOR DE LUMINOSIDAD.....	28
4.1.6. REGULADOR DE VOLTAJE 7805.....	29
4.1.7. OPTOCOPLADOR 4N25.....	29
4.2. DESARROLLO DEL PROGRAMA.....	30
4.2.1. CONFIGURACIÓN DE LA CÁMARA.....	30
4.2.1.1. DATOS DE LA MATRIZ.....	31
4.2.1.2. REGISTROS.....	33
4.2.1.2.1. DESCRIPCION DE LOS REGISTROS.....	37
4.2.1.3. MODOS DE LECTURA.....	44

4.2.1.3.1.	SUBMUESTREO.....	44
4.2.1.3.1.1.	POR SALTOS.....	44
4.2.1.3.1.2.	POR AGRUPACION.....	45
4.2.1.4.	SINCRONIZACION DE DATOS.....	45
4.2.1.5.	CONEXIÓN DE LA TRDB-D5M.....	46
4.2.1.6.	CODIGO DE PROGRAMACION	47
4.2.2.	CONFIGURACIÓN DE LA PANTALLA.....	48
4.2.2.1.	CONEXIÓN DE LA TRDB-LTM.....	48
4.2.2.2.	SINCRONIZACION DE DATOS	50
4.2.2.3.	CODIGO DE PROGRAMACION	52
4.2.3.	PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN.....	53
4.2.3.1.	DETECCIÓN DE NIVELES RGB.....	55
4.2.3.2.	OPERACIONES MATEMÁTICAS	56
4.2.4.	CONTROL PWM.....	59
5.	PRUEBAS Y RESULTADOS.....	60
5.1.	DEMOSTRACION.....	62
5.2.	EVALUACION DE RESULTADOS.....	64
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	66
	BIBLIOGRAFIA.....	67
	ANEXOS.....	68

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de la placa DE0-NANO.....	24
Tabla 2. Parámetros de la Cámara TRDB D5M.....	26
Tabla 3. Parámetros de la pantalla TRDB LTM.....	27
Tabla 4. Ecuaciones cámara TRDB-D5M.....	33
Tabla 5. Registros de la cámara TRDB-D5M.....	37
Tabla 6. Descripción de los registros de la cámara TRDB-D5M.....	43
Tabla 7. Pines de la pantalla TRDB-LTM.....	49
Tabla 8. Parámetros de configuración horizontal de la pantalla TRDB-LTM.....	51
Tabla 9. Parámetros de configuración vertical de la pantalla TRDB-LTM.....	52
Tabla 10. Valores hexadecimales de los colores Rojo, Verde y Azul.....	56
Tabla 11. Valores hexadecimales del color blanco y negro.....	56
Tabla 12. Control de las zonas para el seguimiento de la línea.....	58
Tabla 13. Voltaje controlado por PWM.....	59
Tabla 14. Voltaje controlado por PWM para cada color.....	59
Tabla 15. Nivel RGB de la cinta roja en la pista.....	61
Tabla 16. Nivel RGB de la cinta verde en la pista.....	61
Tabla 17. Nivel RGB de la cinta azul en la pista.....	62

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estructura Robot Seguidor de Línea.....	18
Figura 2. Field Programmable Gate Array (FPGA).....	20
Figura 3. Sensor CCD de cámara digital.....	20
Figura 4. Pantalla TRDB LTM	21
Figura 5. Plataforma robótica.....	21
Figura 6. Diagrama esquemático básico del puente H.....	22
Figura 7. Field Programmable Gate Array (FPGA) DE0-NANO.....	23
Figura 8. Diagrama de bloques de la placa FPGA.....	24
Figura 9. Cámara TRDB D5M (5 Megapíxeles).....	25
Figura 10. Pantalla TRDB LTM.....	26
Figura 11. Puente H L298N.....	27
Figura 12. Sensor de luminosidad DFR0026.....	28
Figura 13. Conexión del sensor de luminosidad DFR0026.....	28
Figura 14. Conexión del regulador de voltaje 7805.....	29
Figura 15. Conexión Optocoplador.....	29
Figura 16. Descripción de la Matriz de píxeles.....	30
Figura 17. Escaneo progresivo de una imagen.....	31
Figura 18. Sincronización predeterminada de datos.....	32
Figura 19. Sincronización predeterminada de datos.....	32
Figura 20. Sub-muestreo por saltos.....	44
Figura 21. Sub-muestreo por agrupación.....	45
Figura 22. Parámetros de temporización del bus serial de dos hilos.....	46
Figura 23. Pines de la cámara TRDB-D5M.....	46
Figura 24. Configuración de la Cámara TRDB-D5M.....	47
Figura 25. Pines de la pantalla TRDB-LTM.....	48
Figura 26. Sincronización de datos de la pantalla y la FPGA.....	50
Figura 27. Sincronización de datos de la pantalla y la FPGA.....	50
Figura 28. Sincronización de datos de la pantalla y la FPGA.....	51
Figura 29. Ejemplo Escaneo Progresivo.....	53
Figura 30. Flip Flop tipo D.....	54
Figura 31. Arreglo de Flip Flop tipo D.....	54
Figura 32. Retardo de N datos.....	55
Figura 33. Lectura de matrices de píxeles.....	55
Figura 34. Zonas de adquisición de datos.....	57
Figura 35. Cinta aislante de colores.....	60
Figura 36. Pista de colores.....	60
Figura 37. Ubicación del robot.....	62
Figura 38. Ubicación del robot.....	63
Figura 39. Ubicación del robot.....	63
Figura 40. Ubicación del robot.....	63
Figura 41. Calidad de la imagen.....	64

Figura 42. Calidad de la imagen.....65
Figura 43. Segmentación de color blanco.....65

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Datasheet del puente H L 298 N.....	68
Anexo B. REGULADOR DE VOLTAJE 7805.....	82
Anexo C. OPTOCOPLADOR 4N25.....	110
Anexo D. Módulo Principal DE0_Nano.....	124
Anexo E. Módulo CCD_Capture.....	140
Anexo F. Módulo I2C_CCD_Config.....	145
Anexo G. Módulo lcd_3wire_config.....	150
Anexo H. Módulo touch_tcon.....	154
Anexo I. Módulo generate.....	159
Anexo J. Módulo linebuffer_3lines.....	160
Anexo K. Módulo PWM.....	163

GLOSARIO

CCD: Charge Coupled Device.

CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor

FPGA: Field Programmable Gate Array.

HDL: Hardware Description Language.

I2C: Inter-Integrated Circuit.

LCD: Liquid Cristal Display.

PWM: Pulse Width Modulation.

RAW: Formato de imagen de los datos directamente desde el sensor CCD.

RGB: Formato estándar de colores Red Green Blue.

SDRAM: Synchronous Dynamic Random-Access Memory.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN ROBOT SEGUIDOR DE LINEA GUIADO POR LOS VALORES DE PÍXELES DE LA IMAGEN EN UNA CAMARA CONECTADA A UNA FPGA

AUTOR(ES): LARRY ANDRES PEREZ SANCHEZ

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): Msc CESAR AUGUSTO ACEROS

RESUMEN

Este trabajo de grado consiste en el diseño y construcción de un robot seguidor de línea controlado por una cámara conectada a una FPGA Cyclone IV en una tarjeta de desarrollo DE0-NANO producida por la empresa TERASIC. La cámara es una TDRB-D5M que es el sensor del sistema y usando algoritmos de visión por computador programados en la FPGA son capaces de guiarlo a través de líneas de 3 colores. El seguimiento de líneas se logra realizando un enmascaramiento de píxeles en la imagen unido a una descomposición y segmentación usando los valores RGB de los píxeles para determinar el color que la cámara está enfocando. Basado en el color se controla los motores del robot para mantener el curso y avanzar a diferentes velocidades. El proyecto es una prueba de concepto para el uso de las FPGA como elemento de control para robots y como una alternativa a los sistemas basados en microprocesador que son tradicionalmente utilizados. Los resultados demuestran que las FPGA son muy prometedoras como elementos para control de robots y para el procesamiento de imágenes, al usar solamente 9000 elementos lógicos de los 22000 elementos disponibles en la FPGA seleccionada.

PALABRAS CLAVES:

Robot, Robot guiado por visión, FPGA, Robot controlado por FPGA.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: CONSTRUCTION OF A LINE FOLLOWER ROBOT GUIDED BY THE VALUES OF PIXELS OF THE IMAGE IN A CAMERA CONNECTED TO A FPGA

AUTHOR(S): LARRY ANDRES PEREZ SANCHEZ

FACULTY: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: Msc CESAR AUGUSTO ACEROS

ABSTRACT

This work consist in the design and construction of a line follower robot controlled by a camera connected to a Cyclone IV FPGA in a development board DE0-NANO from the company Terasic. The camera is a TDRB-D5M that is the sensor of the robot. By the use of computer vision algorithms programmed into the FPGA we are able to guide the robot through a line of three colors. We follow the line by the use of techniques for masking pixels in the camera's image. In addition, it is necessary to make a decomposition and segmentation of the RGB pixel values to determine the color that the camera is focusing. Based in the color detected, the robot controls the motors in order to maintain the course and advance at different speeds in the line. This project is a proof of concept for the use of the FPGA as a control device for robots. Furthermore, FPGA can be an alternative to microprocessor-based systems that has been used traditionally. The results demonstrate that FPGAs are very promising as elements for robot control and for image processing applications. In this project, we use only 9.000 logic elements of the 22.000 available in the selected FPGA

KEYWORDS:

Robot, Robot vision-guided, FPGA, FPGA controlled Robot

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto se presenta como una prueba de concepto para sistemas cámara-FPGA, que demuestra la posibilidad de utilizar las FPGA para hacer procesamiento de imágenes controlando un robot. Dejando a un lado el concepto tradicional de control robótico basado en microprocesadores.

Las técnicas de visión por computador (VC) son estudiadas con el fin de darle facultades a las máquinas de poder ejercer alguna acción según las características extraídas de una imagen. En este proyecto se usan técnicas de desarrollo de hardware y VC para controlar un robot seguidor de línea.

El sistema robótico consta de una cámara que adquiere imágenes y con técnicas de enmascaramiento y características de color se toman acciones de control en el robot seguidor de línea desarrollado.

En este texto encontrara seis (6) capítulos donde se registra la realización del prototipo, pasando por la configuración de cada dispositivo, el procesamiento de imágenes utilizado y los resultados obtenidos que comprueban el correcto funcionamiento del robot.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. DEFINICION DEL PROBLEMA

El control de robots móviles siempre ha sido un problema de investigación y de estudio en la academia y la industria. Los métodos para interactuar de los robots con el mundo tienen una amplia gama de opciones.

En el desarrollo de los diferentes proyectos robóticos realizados en la universidad desde la facultad de ingeniería electrónica siempre se ha promovido realizar los prototipos con micro-controladores y con sensores infrarrojos puntuales y discretos.

Este proyecto busca adicionar una técnica novedosa para el control de robots móviles en la UPB desarrollando el sensor con una cámara digital y por medio de procesamiento de imágenes controlar el robot desde una FPGA. Al utilizar una FPGA se logra obtener un sistema flexible y configurable, donde la utilización de dispositivos como una cámara o una pantalla se pueden conectar directamente sin necesidad dispositivos intermedios de acoplamiento.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 GENERAL

Construir un robot seguidor de línea guiado por los colores de una cámara conectada a la FPGA.

2.2.2 ESPECÍFICOS

- Establecer la forma de conexión de una cámara digital a una FPGA usando la tarjeta DE0-NANO.
- Desarrollar los algoritmos de procesamiento de imágenes para que usando valores de pixeles se pueda guiar el robot usando la FPGA de la tarjeta DE0-NANO.
- Construir y adaptar el robot seguidor de línea para usar una cámara como sensor y la FPGA para control de los servomotores del robot.
- Probar el funcionamiento correcto del robot seguidor de línea usando el desarrollo de hardware diseñado.

2.3 JUSTIFICACION

Al desarrollar este prototipo se contribuye un aporte intelectual al autor del proyecto, así como a todos los estudiantes de la facultad de ingeniería electrónica de la seccional Bucaramanga que tendrán de primera mano la información detallada del proyecto.

Este tipo de proyectos enriquecen a la universidad y a la comunidad, ya que los aportes en el área del desarrollo del robot guiado por el procesamiento de imágenes de una cámara conectada a la FPGA genera una prueba de concepto que amplía los horizontes para los que las FPGA son usadas actualmente.

El proyecto es primero de esta clase en la UPB. Busca ser el inicio de un amplio desarrollo en el área de las FPGA con sistemas de visión en nuestra universidad, dando el paso inicial para que futuros estudiantes de ingeniería electrónica lo retomen y formen parte del desarrollo de este tipo de sistemas en la facultad.

Tradicionalmente las FPGA se han destacado por su alta velocidad y fácil reconfiguración. Por este motivo es una alternativa a los tradicionales sistemas microprocesados en el control de robots.

El alcance logra ser muy amplio debido a que esta clase de proyectos son la base de importantes y útiles investigaciones que podrían ser parte fundamental del desarrollo tecnológico actual.

3 MARCO TEÓRICO

El proyecto de grado abordara temas relacionados con técnicas digitales para el desarrollo del robot seguidor de línea guiado por los valores de los pixeles de la cámara.

3.1 ROBOT SEGUIDOR DE LINEA

Robot diseñado básicamente para cumplir una misión, la cual es seguir una trayectoria trazada sobre una superficie.

3.1.1 ESTRUCTURA

El robot seguidor de línea por lo general contiene los siguientes dispositivos:

1. Sensores
2. Motores DC
3. Ruedas
4. Fuente de energía
5. Base de montaje
6. Tarjeta de control

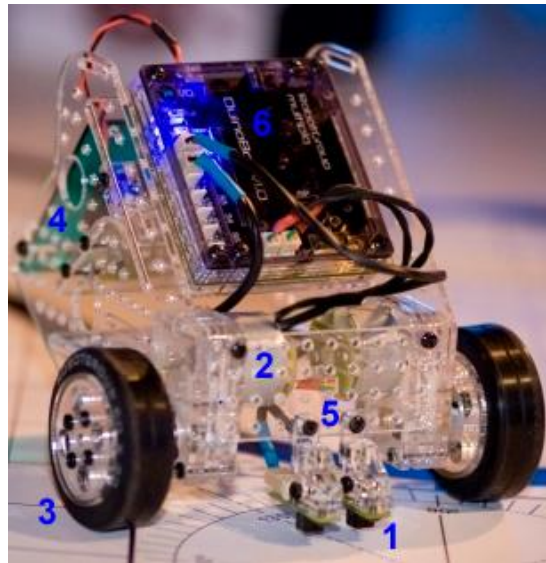


Figura 1. Estructura Robot Seguidor de Línea ¹

3.1.1.1 SENSORES

Dispositivo capaz de detectar una magnitud física y convertirla en una señal eléctrica. En el mercado existe gran variedad de sensores que se caracterizan por la aplicación en la que será usado.

¹ MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGIA E INNOVACION PRODUCTIVA. Debaten sobre infancia, adolescencia y cambio social [Fotografía]. Argentina, Octubre 12 de 2012. Disponible en: <<http://www.mincyt.gov.ar/adjuntos/imagenes/000/018/0000018839.jpg>>

3.1.1.2 MOTORES DC

Dispositivo capaz de convertir la energía eléctrica en mecánica originando un movimiento rotatorio, compuesta básicamente por dos partes las cuales son el rotor y el estator.

3.1.1.3 RUEDAS

Objeto mecánico que tiene forma de disco y que se instala en un eje para que gire a su alrededor.

3.1.1.4 FUENTE DE ENERGIA ELECTRICA

Arreglo de artefactos que acumulan energía con el fin de suminístrala para alimentar energéticamente un circuito eléctrico.

3.1.1.5 BASE DE MONTAJE

Plataforma que soporta los elementos y dispositivos necesarios para el funcionamiento del robot.

3.1.1.6 TARJETA DE CONTROL

Placa que almacena la información necesaria para ejercer una acción programada.

3.2 DISPOSITIVOS USADOS

3.2.1 FPGA CYCLONE IV

Dispositivo semiconductor que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada mediante un lenguaje de descripción especializado. La lógica programable puede reproducir desde funciones tan sencillas como las llevadas a cabo por una puerta lógica hasta complejos sistemas en un chip.

Cyclone IV FPGA Architecture

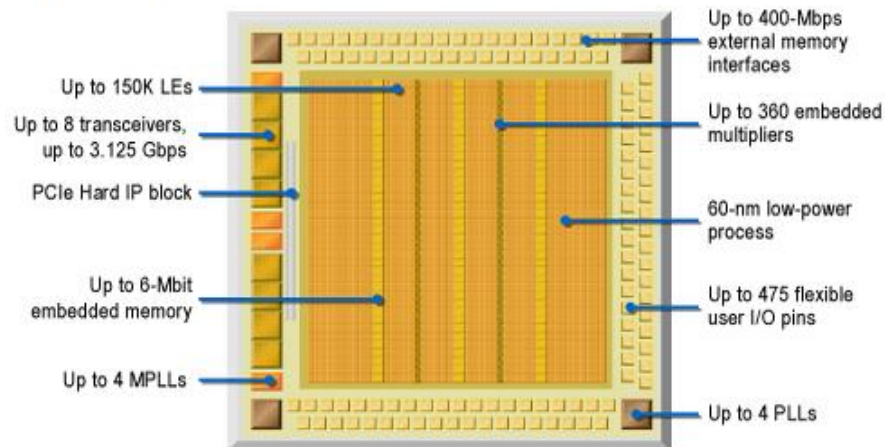


Figura 2. Field Programmable Gate Array (FPGA)²

3.2.2 CAMARA DIGITAL

Dispositivo capaz de capturar imágenes estáticas y convertirlas en un formato digital. La cámara utiliza como plano de enfoque un sensor CCD (Charge Coupled Device), chip sensible a la luz con una superficie fotosensible.



Figura 3. Sensor CCD de cámara digital³

3.2.3 PANTALLA LCD

Superficie electrónica en la cual se forma una imagen. El acrónimo LCD (cristal líquido), es una pantalla delgada formada por un determinado número de píxeles que se colocan delante de una fuente de luz. Este tipo de pantalla utiliza pequeñas cantidades de energía eléctrica por eso se puede utilizar para dispositivos con pilas o baterías.

² TERASIC. DE0-NANO. World Leading FPGA Based Products and Desing Services. User Manual 2003-2014 [Fotografía]. 2014-07-01. Disponible en internet: <https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/ug/DE0_Nano_User_Manual_v1.9.pdf>

³ PIXINFO. Pruebas de las cámaras digitales, hoja de datos. 1999 – 2015 [Fotografía]. Disponible en internet: <https://pixinfo.com/img/Olympus/E-1/E-1_USF_CCD_500m.jpg>



Figura 4. Pantalla TRDB LTM⁴

3.2.4 PLATAFORMA ROBOTICA

El soporte del sistema robótico está compuesto por la base de montaje junto a los motores y ruedas que moverán el robot. El motor utilizado es el motorreductor MTRR110RPM-A, motor DC de 110 rpm a 6V, ruedas livianas, una rueda fija que ayuda a mantener en equilibrio el sistema robótico y el porta baterías que alimentaran energéticamente el robot.

La plataforma 15 cm de ancho x 20 cm de largo x 6.5 cm de alto.

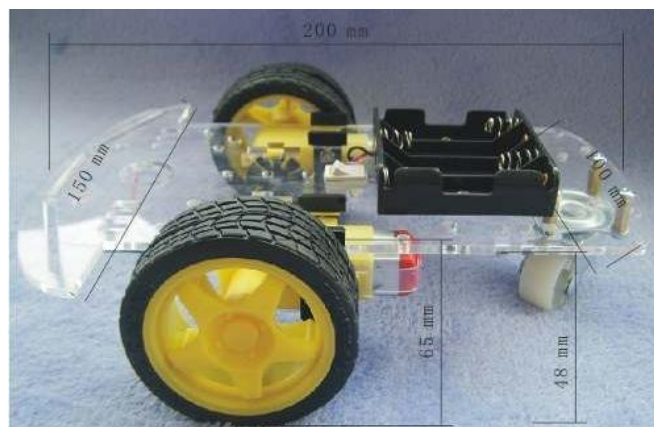


Figura 5. Plataforma robótica⁵

⁴ TERASIC. TRDB_LTM, Inch Digital Touch Panel Development Kit. Document Version 1.22 [Fotografía]. Artículo. 2007-11-09. Disponible en internet: <http://www.terasic.com.tw/attachment/archive/237/TRDB_LTM_UserGuide_v1.22.pdf>

⁵ PRECIOLANDIA. Los mejores precios del mundo [Fotografía]. Plataforma robótica. Disponible en internet: <http://mlm-s1-p.mlstatic.com/9371-MLM20014719158_122013-O.jpg>

3.2.5 PUENTE H

Para controlar los motores del robot se utiliza un puente H, la FPGA al dar una señal lógica de salida activa el enable del puente H, permitiendo energizar el motor. Este aislamiento es necesario debido que el motor contiene una inductancia que puede generar corrientes que afecten la FPGA.

El funcionamiento del puente H consiste en permitir el paso de corriente el motor en un sentido de giro, en la Figura 6 se puede ver la composición básica del puente H. El motor gira en un sentido cuando S1 y S4 estén encendidos con S2 y S3 apagados y girara en sentido contrario cuando S2 y S3 estén encendidos y S1 y S4 estén apagados.

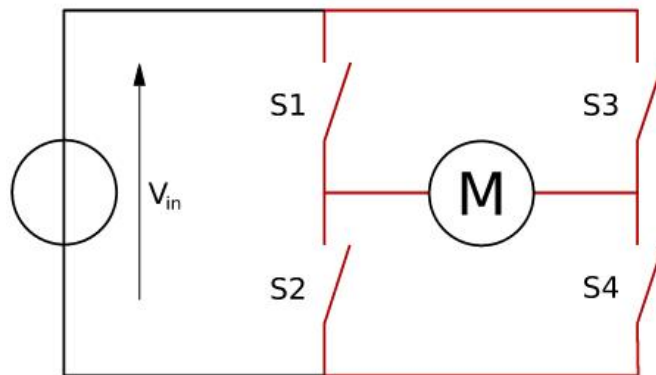


Figura 6. Diagrama esquemático básico del puente H⁶

4 PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA

4.1 SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

Para el desarrollo del robot se escogieron los siguientes dispositivos.

4.1.1 TARJETA FPGA DE0 NANO

Dispositivo semiconductor que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada mediante un lenguaje de descripción especializado. La lógica programable puede reproducir desde funciones tan sencillas como las llevadas a cabo por una puerta lógica hasta complejos sistemas en un chip.

⁶ WIKIMEDIA FOUNDATION. Wikipedia, la enciclopedia libre [Fotografía]. Diagrama puente H. Disponible en internet: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/H_bridge.svg>

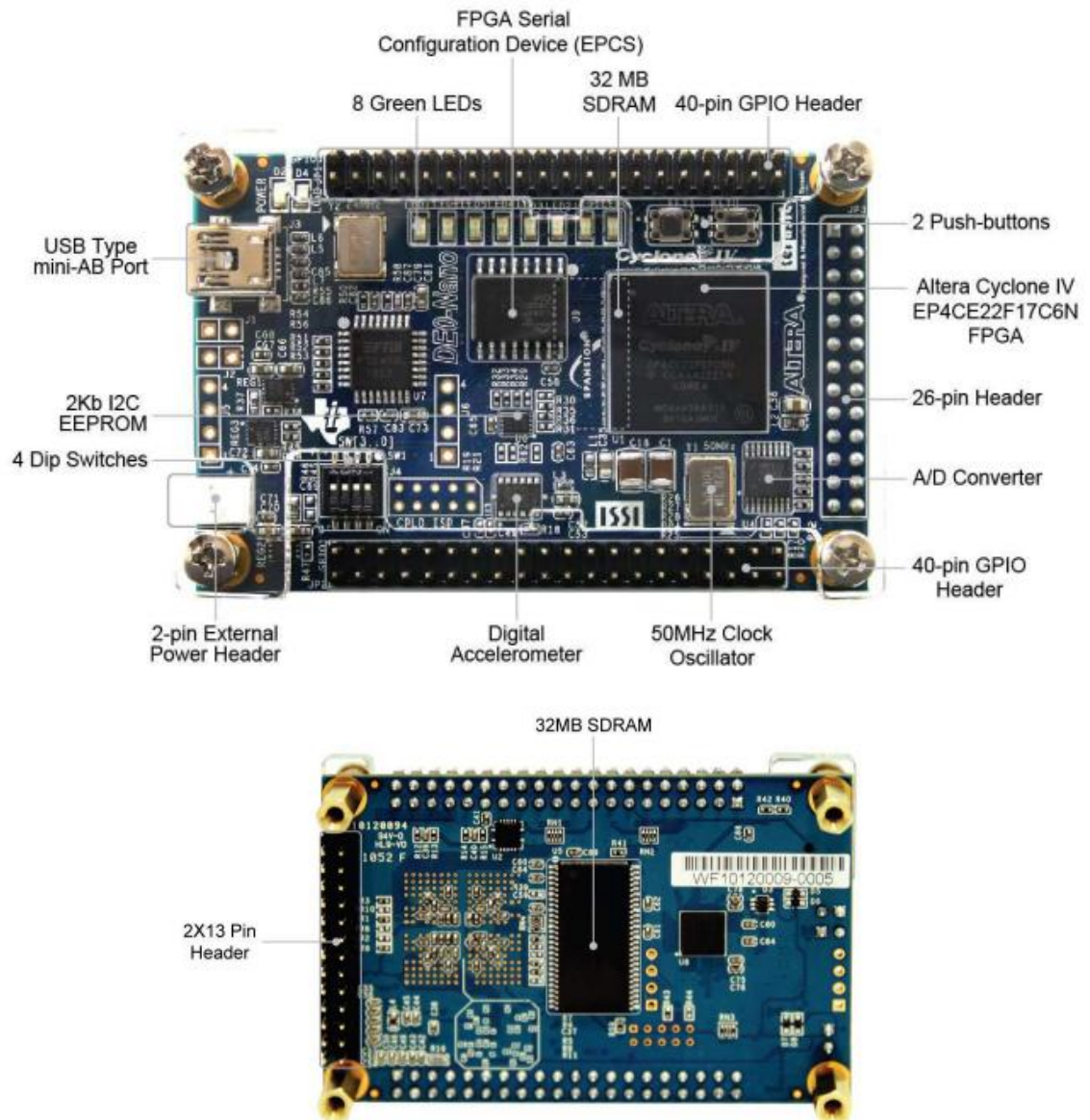


Figura 7. Field Programmable Gate Array (FPGA) DE0-NANO⁷

La FPGA se monta sobre una placa con dispositivos que permiten su utilización, como lo son dispositivos de memoria, puertos I/O, cabezal de alimentación externa, pulsadores, interruptores, entre otros dispositivos según el diseño de la placa.

⁷ TERASIC. DE0-NANO. World Leading FPGA Based Products and Desing Services. User Manual 2003-2014 [Fotografía]. 2014-07-01. Disponible en internet: <https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/ug/DE0_Nano_User_Manual_v1.9.pdf>

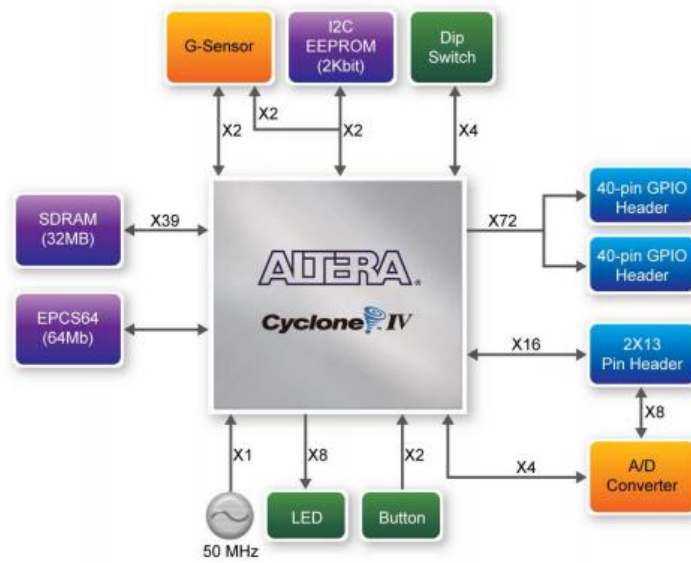


Figura 8. Diagrama de bloques de la placa FPGA⁸

CARACTERISTICAS DE LA PLACA DE0- NANO	
CARACTERISTICA	DESCRIPCION
FPGA	<ul style="list-style-type: none"> Cyclone IV configuración serial EPCS16 16MB
INTERFACES DE E/S	<ul style="list-style-type: none"> Cable USB-BLASTER para configuración de la FPGA Acelerómetro de 3 ejes con resolución de 13 bits Convertidor ADC, 8 canales, 12 bits de resolución Conectores de expansión (2 de 40 pines y 1 de 26 pines) Conectores para alimentación de voltaje externa
MEMORIA	<ul style="list-style-type: none"> SDRAM 32 MB EEPROM 2 KB
INTERRUPTORES Y LEDS	<ul style="list-style-type: none"> 8 LEDS VERDES 4 INTERRUPTORES DIP SWITCH 2 PULSADORES
RELOJ	<ul style="list-style-type: none"> RELOJ DE 50 MHz

Tabla 1. Características de la placa DE0-NANO

Para el proyecto utilizaremos la tarjeta FPGA DE0 – NANO, placa diseñada por la empresa TERASIC, que contiene los elementos lógicos suficientes para ejecutar el

⁸ TERASIC. DE0-NANO. World Leading FPGA Based Products and Desing Services. User Manual 2003-2014 [Fotografía]. 2014-07-01. Disponible en internet: <https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/ug/DE0_Nano_User_Manual_v1.9.pdf>

control sobre el robot. La programación de la FPGA se puede realizar mediante código Verilog HDL, VHDL, AHDL, Qsys System, SystemVerilog, entre otros lenguajes de programación que se pueden manipular desde la herramienta Quartus II.

En los puertos I/O llamados GPIO, se conectan los dispositivos externos que serán controlados desde la FPGA, siendo la FPGA la tarjeta de control del sistema robótico.

4.1.2 CAMARA TRDB-D5M

Cámara diseñada por la empresa TERASIC para ser conectada al GPIO de la placa de la FPGA, arroja una matriz de pixeles de 2752 columnas por 2004 filas, con una región activa de 2592 columnas por 1944 filas, que conforma una imagen de 5 Megapíxeles. La cámara cumplirá el papel de sensor y guía del sistema robótico.

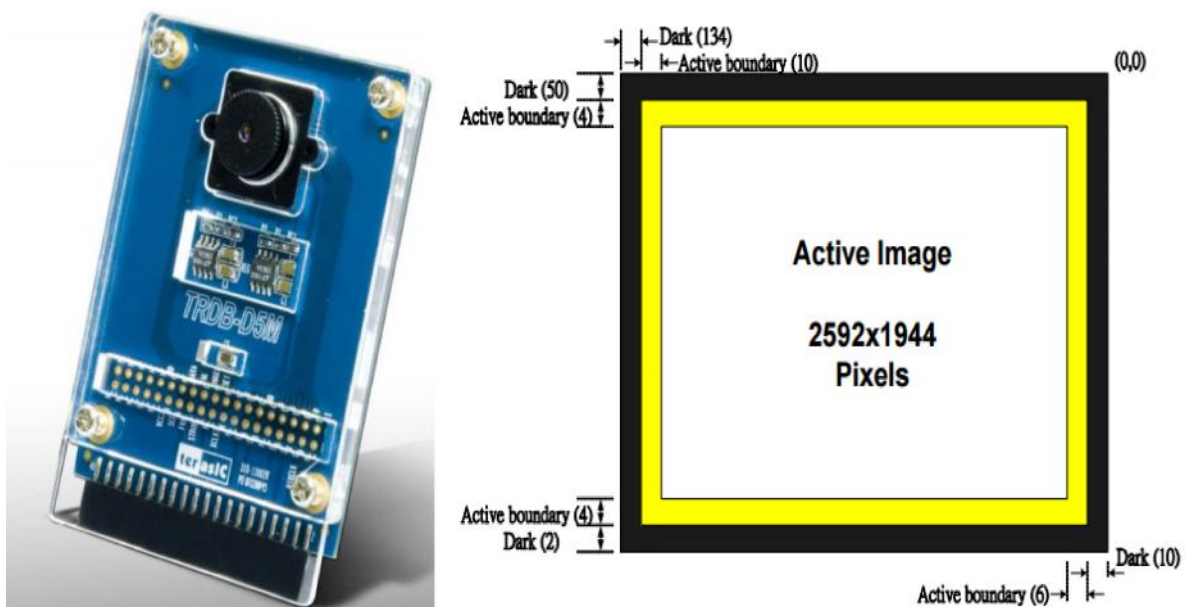


Figura 9. Cámara TRDB D5M (5 Megapíxeles)⁹

En la siguiente tabla se puede ver los parámetros de la cámara TRDB-D5M.

⁹ TERASIC. THDB-D5M, Terasic D5M Hardware Specification [Fotografía]. Artículo. 2008-04-18. Disponible en internet: <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse467/08au/labs/Resources/THDB-D5M_Hardware%20specification.pdf>

Parámetro	Valor
Pixeles Activos	2.592H x 1.944V
Tamaño de pixel (HxV)	2.2 μm x 2.2 μm
Filtro de color	RGB
Tipo de obturador	GRR
Resolución ADC	12 bits
Capacidad de respuesta	1.4 v/lux-sec (550 nm)
Voltaje de alimentación	3.3 v
Voltaje I/O	1.7v ~ 3.1v

Tabla 2. Parámetros de la Cámara TRDB D5M

El formato de salida de los pixeles es del patrón Bayer que consiste en tres colores de filtro, Green 1, Green 2, Rojo y Azul (G1, G2, R, B), arrojando datos de pixel de 12 bits por cada ciclo de reloj.

4.1.3 PANTALLA TRDB-LTM

Pantalla LCD de 4,3" táctil de 800 x 480 pixeles de resolución, equipada con funciones de controlador de código, interfaz de puerto serie, temporización del controlador y circuitos de alimentación. Para controlar estas funciones se configuran desde la FPGA los registros necesarios a través de la interfaz puerto serie que está conectado por el GPIO de la placa a la pantalla, será utilizada en el robot para visualizar la trayectoria.



Figura 10. Pantalla TRDB LTM¹⁰

¹⁰ TERASIC. TRDB_LTM, Inch Digital Touch Panel Development Kit. Document Version 1.22 [Fotografía]. Artículo. 2007-11-09. Disponible en internet: <http://www.terasic.com.tw/attachment/archive/237/TRDB_LTM_UserGuide_v1.22.pdf>

Parámetro	Descripción	Unidad
Tamaño de pantalla (Diagonal)	4.3 pulgadas	Pulgadas
Radio de aspecto	15:09	-
Tipo de Pantalla	Transmisivo	-
Área Activa (HxV)	93.6 x 56.16	mm
Radio de aspecto	800 x RGB x 480	Pixeles
Tamaño de pixel (HxV)	0.039 x 0.117	mm
Arreglo de Color	Líneas	-
Valores de Color	16 Millones	-

Tabla 3. Parámetros de la pantalla TRDB LTM

4.1.4 PUENTE H

Para el robot se utilizó el puente H L298N (Figura 11) que permite manejar dos motores, se puede energizar con voltajes entre 6 v y 12, la corriente máxima que maneja es de 2A, el datasheet lo podrá encontrar en el anexo A.

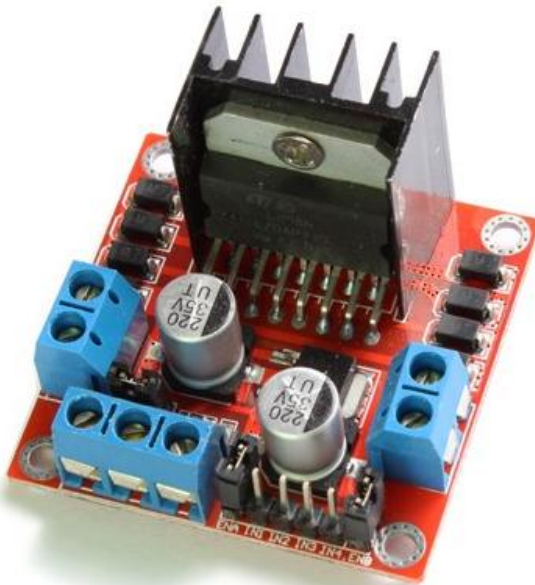


Figura 11. Puente H L298N¹¹

¹¹ TECHMAKE ELECTRONICS. Tienda Electronica. Puente H [Fotografía]. Disponible en internet: < http://www.techmake.com/media/catalog/product/cache/1/image/650x/040ec09b1e35df139433887a97daa66f/r/o/rob-00108_01_1.jpg>

4.1.5 SENSOR DE LUMINOSIDAD

Sensor análogo capaz de medir la intensidad luminosa del ambiente al que es expuesto, utiliza un fotorresistor que entrega un valor bajo si es un ambiente con intensidad luminosa oscura. Se puede energizar con voltajes entre 3v – 5v, obteniendo en la salida analógica una tensión entre 0v – 3.3v.



Figura 12. Sensor de luminosidad DFR0026¹²

El sensor tiene un conector PCB estándar de 3 pines que se enlaza de siguiente manera.

1. Señal de salida analógica
2. GND
3. Tensión de alimentación

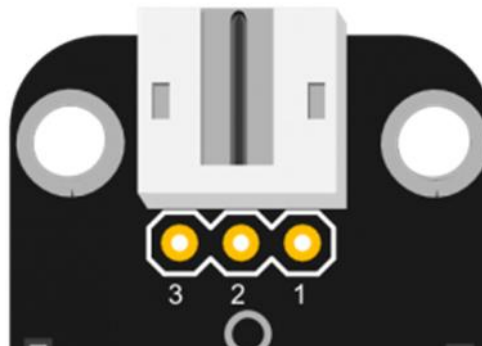


Figura 13. Conexión del sensor de luminosidad DFR0026¹³

¹² DFROBOT. Drive the future. Sensor de Luminancia [Fotografía]. Disponible en internet: < http://www.dfrobot.com/wiki/images/2/26/Sensors_for_arduino3.png >

¹³ DFROBOT. Drive the future. Sensor de Luminancia [Fotografía]. Disponible en internet: < http://www.dfrobot.com/wiki/index.php?title=File:DFRobot_Ambient_Light_Sensor.png >

4.1.6 REGULADOR DE VOLTAJE 7805

Regulador de voltaje de 3 terminales con tensión de salida fija 5v. Hoja de datos del integrado disponible en el anexo B. El integrado es utilizado para mantener un voltaje fijo de 5 voltios que alimente la FPGA que a su vez conecta la cámara TRDB D5M y la pantalla TRDB LTM. Además se utiliza otro integrado para mantener el voltaje fijo de 5 voltios de voltaje máximo que alcanzaran los motores controlados por PWM.

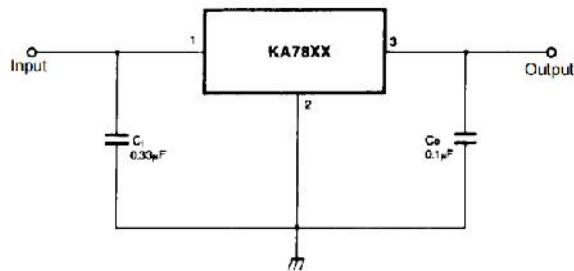
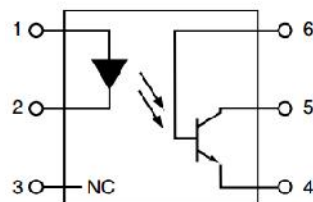


Figura 14. Conexión del regulador de voltaje 7805¹⁴

4.1.7 OPTOCOPLADOR 4N25

El robot utiliza dos fuentes de energía, una para el área de control y la segunda para el área de potencia. El optocoplador actúa como puente entre estas dos áreas, recibiendo la señal PWM proveniente de la FPGA habilitando o no, el puente H que maneja los motores.



PIN 1. ANODE
2. CATHODE
3. NO CONNECTION
4. EMITTER
5. COLLECTOR
6. BASE

Figura 15. Conexión Optocoplador¹⁵

¹⁴ DATASHEETCATALOG. Fuente libre de hojas de datos en línea [Fotografía]. Figura 5, Documento. Disponible en internet: < http://pdf.datasheetcatalog.net/datasheets/228/390068_DS.pdf >

¹⁵ DATASHEETCATALOG. Fuente libre de hojas de datos en línea [Fotografía], Documento. Disponible en internet: < <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/fairchild/4N25.pdf> >

4.2 DESARROLLO DEL PROGRAMA

4.2.1 CONFIGURACION DE LA CAMARA

La cámara TRDB-D5M entrega un matriz de pixeles de 2752 columnas por 2004 filas, pixeles entregados en formato Bayer que consiste en cuatro “colores”, Green 1, Green 2, Red y Blue, representando tres colores de filtro. El Green 1 y Green 2 tienen el mismo filtro de color, pero son tratados como colores separados por la ruta de datos la cadena de señal analógica.

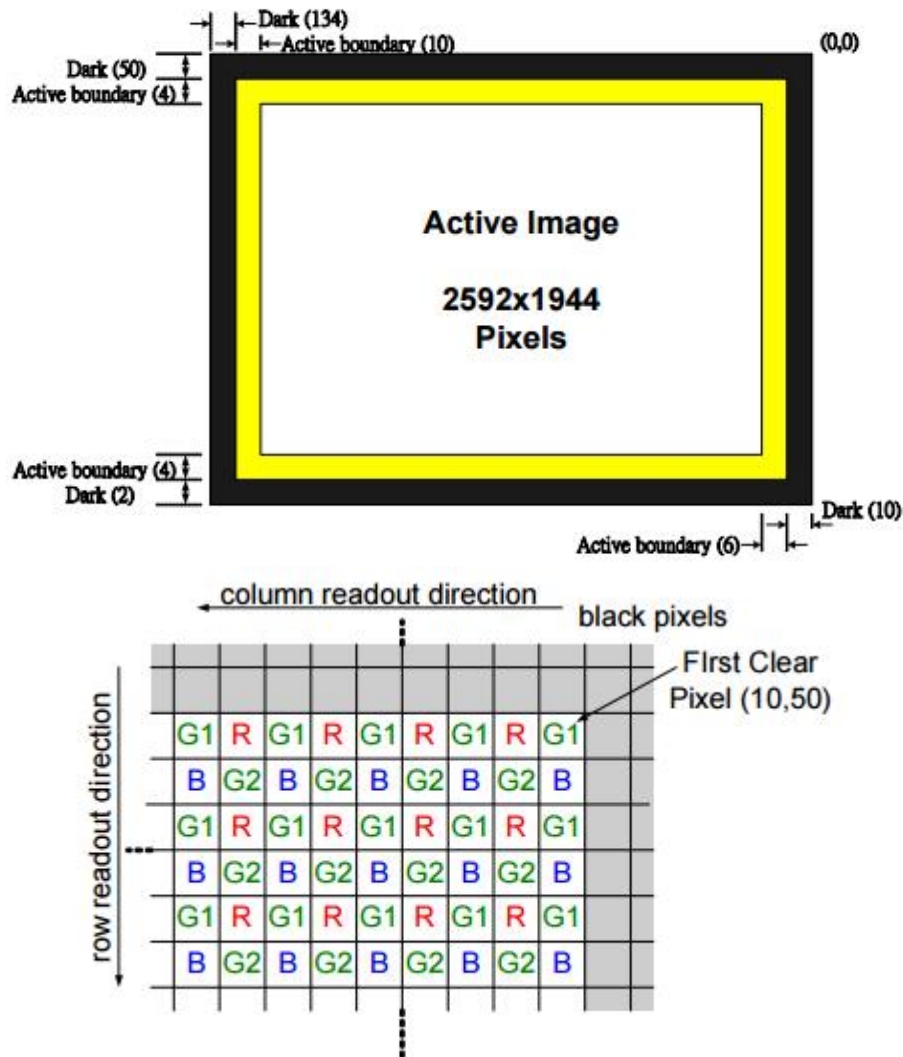


Figura 16. Descripción de la Matriz de píxeles¹⁶

¹⁶ TERASIC. THDB-D5M, Terasic D5M Hardware Specification [Fotografía]. Artículo. 2008-04-18. Disponible en internet: <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse467/08au/labs/Resources/THDB-D5M_Hardware%20specification.pdf>

En la Figura 16 se aprecia que el área activa de la matriz de pixeles es de 2592 columnas por 1944 filas, el punto (0,0) de la matriz corresponde al límite superior derecho de imagen, el punto (10,50) de la matriz corresponde al primer pixel del área activa de la imagen. De forma predeterminada se toman los datos del pixel (16, 54) como primer pixel, para evitar datos erróneos debido al escalonamiento de la franja Negra al área activa.

4.2.1.1 DATOS DE LA MATRIZ

La cámara captura la imagen haciendo un escaneo progresivo, esto significa que hace un barrido en la imagen desde el primer pixel de la primera fila hasta la última fila cubriendo así la primera columna, luego repite el mismo procedimiento para la segunda columna hasta la última columna obteniendo así los datos de todas la imagen.

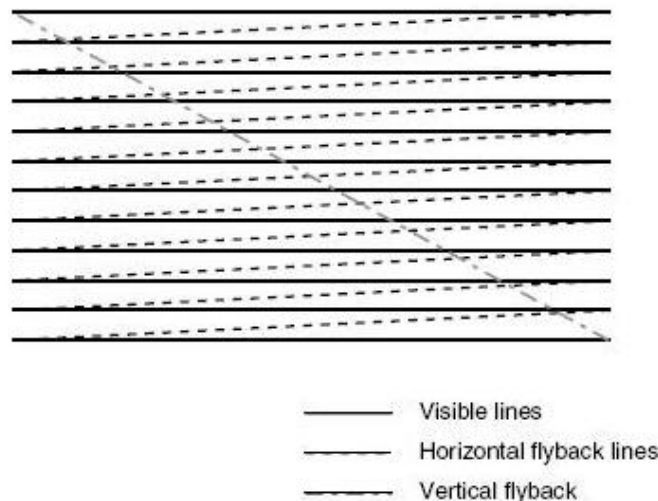


Figura 17. Escaneo progresivo de una imagen¹⁷

Recordando que no se van a tomar todos los datos de la imagen se debe hacer un control para obtener solo los datos del área activa o del área que se necesite. El pin LVAL y el pin FVAL de la pantalla permiten establecer cuando hacer la toma de datos, si los dos se encuentran en un ALTO lógico quiere decir que se encuentran en el área activa de la imagen.

Esta toma de datos necesita un reloj para hacer el muestreo periódico de los datos, el reloj se conecta en el pin PIXCLK de la cámara, por cada ciclo de reloj habrá un dato de 12 bits en las salidas de la cámara correspondiente al valor de pixel que este viendo en ese ciclo. Este proceso se puede apreciar en la Figura 18.

¹⁷ ARREDONDO TOMAS. Departamento de Electrónica U.T.F.S.M. [Fotografía]. Disponible en internet: < http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo330/2s06/projects/EspinozaAlarcon/pro_elo330/progresivo.jpg >

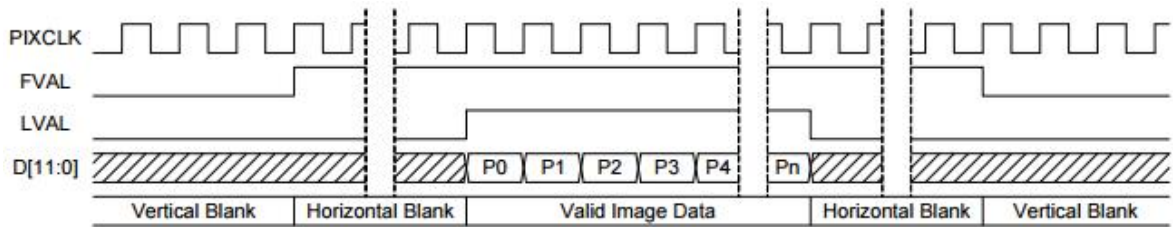


Figura 18. Sincronización predeterminada de datos¹⁸

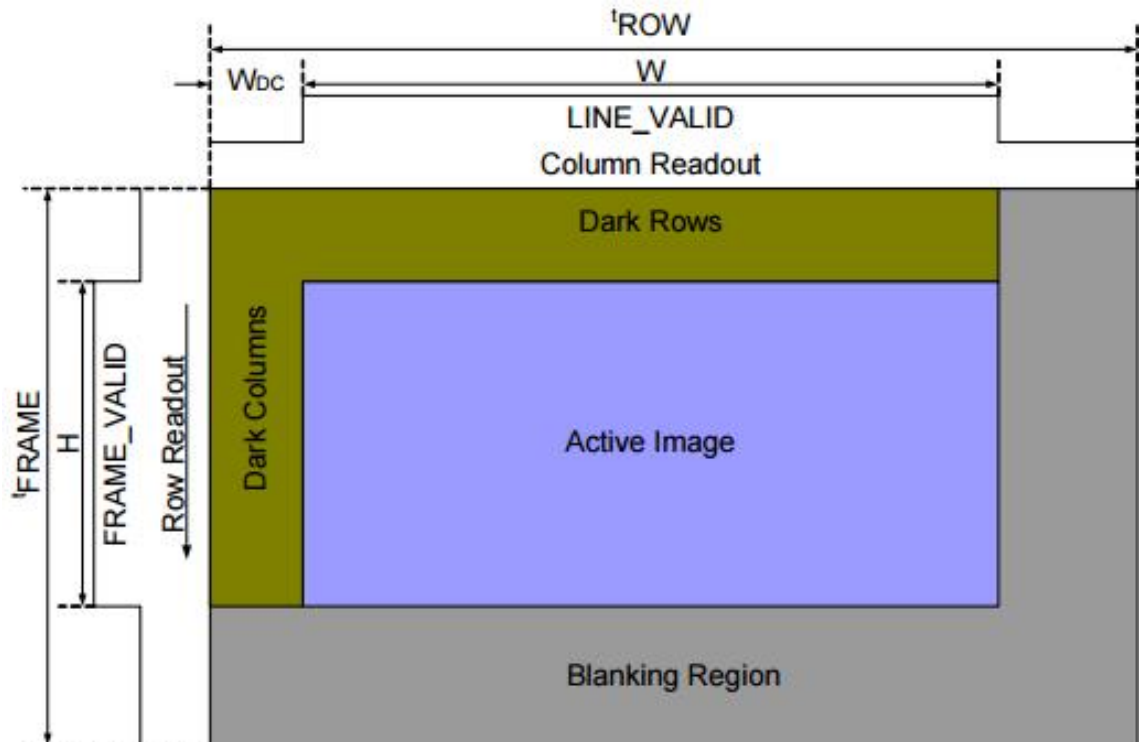


Figura 19. Sincronización predeterminada de datos¹⁹

El periodo de una fila es el tiempo que recorre entre la primera salida pixel hasta la primera salida de pixel de la otra fila. Este tiempo y otros parámetros se calculan con las ecuaciones de la Tabla 4.

¹⁸ TERASIC. THDB-D5M, Terasic D5M Hardware Specification [Fotografía]. Artículo. 2008-04-18. Disponible en internet: <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse467/08au/labs/Resources/THDB-D5M_Hardware%20specification.pdf>

¹⁹ TERASIC. THDB-D5M, Terasic D5M Hardware Specification [Fotografía]. Artículo. 2008-04-18. Disponible en internet: <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse467/08au/labs/Resources/THDB-D5M_Hardware%20specification.pdf>

R5: 0 (R0x005)	Horizontal Blank	0000 dddd dddd dddd	0 (0x0000)
R6: 0 (R0x006)	Vertical Blank	0000 0ddd dddd dddd	25 (0x0019)
R7: 0 (R0x007)	Control de Salida	0d0d dddd dddd dddd	8066 (0x1F82)
R8: 0 (R0x008)	Ancho Shutter Alto	0000 0000 0000 dddd	0 (0x0000)
R9: 0 (R0x009)	Ancho Shutter Bajo	dddd dddd dddd dddd	1943 (0x0797)
R10: 0 (R0x00A)	Píxel Clock Control	D000 0ddd 0ddd dddd	0 (0x0000)
R11: 0 (R0x00B)	Reanudar	0000 0000 0000 0ddd	0 (0x0000)
R12: 0 (R0x00C)	Shutter Delay	000d dddd dddd dddd	0 (0x0000)
R13: 0 (R0x00D)	Restablecer	0000 0000 0000 000d	0 (0x0000)
R16: 0 (R0x010)	Control de PLL	ddd0 000d dddd 00dd	80 (0x0050)
R17: 0 (R0x011)	Config PLL 1	dddd dddd dddd 00dd	25604 (0x6404)
R18: 0 (R0x012)	Config PLL 2	000d 000d dddd dddd	0 (0x0000)
R20: 0 (R0x014)	Reservado	-	54 (0x36)
R21: 0 (R0x015)	Reservado	-	16 (0x10)
R30: 0 (R0x01E)	Modo Leer 1	0ddd dddd dddd dddd	16390 (0x4006)
R32: 0 (R0x020)	Modo Leer 2	dddd D000 0ddd 00D0	64 (0x0040)
R34: 0 (R0x022)	Modo dirección de fila	0ddd 0ddd 0ddd 00dd	0 (0x0000)
R35: 0 (R0x023)	Modo dirección de Columna	0000 0ddd 00dd 0ddd	0 (0x0000)
R36: 0 (R0x024)	Reservado	-	2 (0x0002)
R39: 0 (R0x027)	Reservado	-	11 (0x000B)
R41: 0 (R0x029)	Reservado	-	1153 (0x0481)
R42: 0 (R0x02A)	Reservado	-	4230 (0x1086)
R43: 0 (R0x02B)	Ganancia Green1	0ddd dddd dddd dddd	8 (0x0008)
R44: 0 (R0x02C)	Ganancia Blue	0ddd dddd dddd dddd	8 (0x0008)
R45: 0 (R0x02D)	Ganancia Red	0ddd dddd dddd dddd	8 (0x0008)

R46: 0 (R0x02E)	Ganancia Green2	0ddd dddd dddd dddd	8 (0x0008)
R60: 0 (R0x03C)	Reservado	-	4112 (0x1010)
R61: 0 (R0x03D)	Reservado	-	5 (0x0005)
R62: 0 (R0x03E)	Reservado	-	32967 (0x80C7)
R63: 0 (R0x03F)	Reservado	-	4 (0x0004)
R64: 0 (R0x040)	Reservado	-	7 (0x0007)
R65: 0 (R0x041)	Reservado	-	0 (0x0000)
R66: 0 (R0x042)	Reservado	-	3 (0x0003)
R67: 0 (R0x043)	Reservado	-	3 (0x0003)
R68: 0 (R0x044)	Reservado	-	515 (0x0203)
R69: 0 (R0x045)	Reservado	-	4112 (0x1010)
R70: 0 (R0x046)	Reservado	-	4112 (0x1010)
R71: 0 (R0x047)	Reservado	-	4112 (0x1010)
R72: 0 (R0x048)	Reservado	-	16 (0x0010)
R73: 0 (R0x049)	Fila Negro Target	0000 dddd dddd dddd	168 (0x00A8)
R74: 0 (R0x04A)	Reservado	-	16 (0x0010)
R75: 0 (R0x04B)	Fila Negro predeterminado Offset	0000 dddd dddd dddd	40 (0x0028)
R76: 0 (R0x04C)	Reservado	-	16 (0x0010)
R77: 0 (R0x04D)	Reservado	-	8224 (0x2020)
R78: 0 (R0x04E)	Reservado	-	4112 (0x1010)
R79: 0 (R0x04F)	Reservado	-	20 (0x0014)
R80: 0 (R0x050)	Reservado	-	32768 (0x8000)
R81: 0 (R0x051)	Reservado	-	7 (0x0007)
R82: 0 (R0x052)	Reservado	-	32768 (0x8000)
R83: 0 (R0x053)	Reservado	-	7 (0x0007)

R84: 0 (R0x054)	Reservado	-	8 (0x0008)
R86: 0 (R0x056)	Reservado	-	32 (0x0020)
R87: 0 (R0x057)	Reservado	-	4 (0x0004)
R88: 0 (R0x058)	Reservado	-	32768 (0x8000)
R89: 0 (R0x059)	Reservado	-	7 (0x0007)
R90: 0 (R0x05A)	Reservado	-	4 (0x0004)
R91: 0 (R0x05B)	BLC_Sample_Size	0000 0000 0000 000d	1 (0x0001)
R92: 0 (R0x05C)	BLC_Tune_1	0000 dddd dddd dddd	90 (0x005A)
R93: 0 (R0x05D)	BLC_Delta_Thresholds	0ddd dddd dddd 0ddd	11539 (0x2D13)
R94: 0 (R0x05E)	BLC_Tune_2	0ddd 000d dddd dddd	16895 (0x41FF)
R95: 0 (R0x05F)	BLC_Target_Thresholds	0ddd dddd dddd 0ddd	8989 (0x231D)
R96: 0 (R0x060)	Green1_Offset	0000 000d dddd dddd	32 (0x0020)
R97: 0 (R0x061)	Green2_Offset	0000 000d dddd dddd	32 (0x0020)
R98: 0 (R0x062)	Black_Level_Calibration	dddd D000 0000 00dd	0 (0x0000)
R99: 0 (R0x063)	Red_Offset	0000 000d dddd dddd	32 (0x0020)
R100: 0 (R0x064)	Blue_Offset	0000 000d dddd dddd	32 (0x0020)
R112: 0 (R0x070)	Reservado	-	103 (0x0067)
R113: 0 (R0x071)	Reservado	-	42752 (0xA700)
R114: 0 (R0x072)	Reservado	-	42752 (0xA700)
R115: 0 (R0x073)	Reservado	-	3072 (0x0C00)
R116: 0 (R0x074)	Reservado	-	1536 (0x0600)
R117: 0 (R0x075)	Reservado	-	22039 (0x5617)
R118: 0 (R0x076)	Reservado	-	27509 (0x6B75)
R119: 0 (R0x077)	Reservado	-	27509 (0x6B75)
R120: 0 (R0x078)	Reservado	-	42240 (0xA500)
R121: 0 (R0x079)	Reservado	-	43776 (0xAB00)

R122: 0 (R0x07A)	Reservado	-	43268 (0xA904)
R123: 0 (R0x07B)	Reservado	-	42761 (0xA709)
R124: 0 (R0x07C)	Reservado	-	42752 (0xA700)
R125: 0 (R0x07D)	Reservado	-	65280 (0xFF00)
R126: 0 (R0x07E)	Reservado	-	43264 (0xA900)
R127: 0 (R0x07F)	Reservado	-	43264 (0xA900)
R128: 0 (R0x080)	Reservado	-	34 (0x0022)
R129: 0 (R0x081)	Reservado	-	7940 (0x1F04)
R130: 0 (R0x082)	Reservado	-	0 (0x0000)
R131: 0 (R0x083)	Reservado	-	6918 (0x1B06)
R132: 0 (R0x084)	Reservado	-	7432 (0x1D08)
R134: 0 (R0x086)	Reservado	-	6150 (0x1806)
R135: 0 (R0x087)	Reservado	-	6664 (0x1A08)
R144: 0 (R0x090)	Reservado	-	2000 (0x07D0)
R255: 0 (R0x0FF)	Versión de Chip	???? ????? ????? ?????	6145 (0x1801)

Tabla 5. Registros de la cámara TRDB-D5M

4.2.1.2.1 DESCRIPCION DE LOS REGISTROS

REGISTRO #	Bits	Valor por defecto	Descripción
R0: 0 (R0x000)	15:0	0x1801	Versión Chip
R1: 0 (R0x001)	15:0	0x0036	Fila de inicio Establece el valor de la coordenada Y de la esquina superior izquierda. Si se llegara a establecer un valor erróneo utilizara el valor más bajo cercano al erróneo. Valor decimal entre 0 y 2004.
R2: 0 (R0x002)	15:0	0x0010	Columna de Inicio Establece el valor de la coordenada X de la esquina superior izquierda del campo de visión. Valor decimal entre 0 y 2750.
R3: 0 (R0x003)	15:0	0x0797	Número de filas La altura del campo de visión menos uno. Si este registro se establece en un valor par, utilizara el valor mayor impar. Valor decimal entre 1 y 2005.
R4: 0 (R0x004)	15:0	0x0A1F	Número de columnas

Ancho de campo de vista menos uno. Si este registro se establece en un valor par, utilizara el valor mayor impar. Valor decimal entre 1 y 2571.			
REGISTRO #	Bits	Valor por defecto	Descripción
R5: 0 (R0x005)	15:0	0x0000	Blanco Horizontal
El tiempo extra se añade el final de cada fila. Incrementando este registro se aumenta la exposición y disminuye la velocidad de fotogramas. Valor decimal entre 0 y 4095.			
R6: 0 (R0x006)	15:0	0x0019	Blanco Vertical
El tiempo extra que se añade al final de cada trama de filas menos uno. Incrementando este registro de disminuye la frecuencia de imagen pero no afecta la exposición. Valor decimal entre 8 y 2047.			
R7: 0 (R0x007)	15:0	0x1F82	Control de Salida
	15	X	Reservado
	14	0x0000	Reservado
	13	X	Reservado
	12:10	0x0007	Velocidad de respuesta de salida
Controla el flanco de subida en la salida digital excepto para PIXCLK. Valor decimal entre 0 y 7.			
	9:7	0x0007	Velocidad de respuesta PIXCLK
Controla el flanco de subida de PIXCLK. Los valores más altos implican tiempos de transición más rápida. Valores decimales entre [0:7].			
	6	0x0000	Reservado
	5:4	X	Reservado
	3	0x0000	Reservado
	2	0x0000	Datos FIFO
Cuando se establece en alto los valores serán enviados a través de la FIFO. Esto permite que el puerto de salida que se ejecuta a una velocidad más lenta que PIXCLK emita durante la franja blanca horizontal.			
	1	0x0001	Habilitación del Chip
Cuando se establece en bajo la lectura del sensor se detiene y la circuitería analógica se pone en un estado de energía mínima. Cuando se establece en alto opera el chip de acuerdo con el modo actual. Escribiendo este bit no afecta los valores de otros registros.			
	0	0x0000	Sincronizador de cambios
Cuando se establece en alto no permite cambios en los registros.			
R8: 0 (R0x008)	15:0	0x0000	Ancho de obturación alta
Los bits más significativos de la anchura del obturador, que se combina con el ancho de obturación baja.			
R9: 0 (R0x009)	15:0	0x0797	Ancho de obturación baja
Los bits menos significativos de la anchura del obturador.			
R10: 0 (R0x00A)	15:0	0x0000	Pixel Clock Control
Cuando se encuentra en el flanco de subida LVAL, FAL y D [11:0] son leídos.			
R11: 0 (R0x00B)	15:0	0x0000	Reiniciar
	15:3	X	Reservado
	2	0x0000	Disparador
Al activar este bit en modo continuo hará que el siguiente disparo pareciera tomado por un disparador.			
	1	0x0000	Reiniciar Pausa
Cuando se establece en alto el sensor hará una pausa en la fila 0.			
	0	0x0000	Reanudar

Al configurar este bit hará que el sensor abandone la trama actual y reinicie desde la primera fila. La configuración manual de este bit causara un comportamiento indefinido.			
REGISTRO #	Bits	Valor por defecto	Descripción
R12: 0 (R0x00C)	15:0	0x0000	Retardo de obturación
Ajuste negativo a la anchura de obturación eficaz. Valores decimal entre 0 y 8191.			
R13: 0 (R0x00D)	15:0	0x0050	Reinicializar
Al activarse este registro el sensor se reestablece a su valor predeterminado. Al desactivarse reanudara el funcionamiento normal.			
R16: 0 (R0x010)	15:0	0x0050	Control de PLL
	15	0x0000	Reservado
	14:13	0x0000	Reservado
	12:9	X	Reservado
	8	0x0000	Reservado
	7:4	0x0005	Reservado
	3:2	X	Reservado
	1	0x0000	Uso PLL
Cuando está en un estado alto utiliza la salida PLL como reloj del sistema. Cuando está en un estado bajo utiliza XCLKIN como reloj del sistema.			
	0	0x0000	Potencia PLL
Cuando está en un estado alto el PLL se activa, en caso contrario esta desactivado.			
R17: 0 (R0x011)	15:0	0x6404	PLL Configuración 1
	15:8	0x0064	PLL m Factor
Multiplicador de frecuencia de salida. Valor decimal entre 16 y 255.			
	7:6	X	Reservado
	5:0	0x0004	PLL n Divisor
Divisor de frecuencia de salida menos uno. Valor decimal entre 0 y 63.			
R18: 0 (R0x012)	15:0	0x0000	PLL Configuración 2
	15:13	X	Reservado
	12:8	0x0000	Reservado
	7:5	X	Reservado
	4:0	0x0000	PLL p1 Divisor
PLL divisor del sistema menos uno. Si esto se establece en un número par, el ciclo de trabajo del reloj no será 50:50. Valor decimal entre 0 y 127.			
R20: 0 (R0x014)	15:0	0x0036	Reservado
R21: 0 (R0x015)	15:0	0x0010	Reservado
R30: 0 (R0x01E)	15:0	0x4006	Modo leer 1
	15	X	Reservado
	14	0x0001	Reservado
	13	0x0000	Reservado
	12	0x0000	Reservado
	11	0x0000	XOR LVAL
Cuando es un valor alto produce una señal LVAL que es la XOR entre FVAL y la line_valid normal. Ineficaz cuando Line Valid está establecido en modo continuo.			
	10	0x0000	Line Valid Continuo
Cuando es un valor alto produce la señal LVAL incluso durante el periodo Vertical Blank. En estado bajo			

9	0x0000	Invertir Disparador	
Cuando es un estado alto, se invertirá el sentido de entrada de disparo.			
8	0x0000	Snapshot	
Cuando está en un estado alto, el sensor entra en el modo instantáneo.			
7	0x0000	Reinicio Global	
6	0x0000	Bombilla de exposición	
Cuando se establece en un valor alto el tiempo de exposición se controla mediante un disparador externo.			
5	0x0000	Invertir STROBE	
4	0x0000	Habilitar STROBE	
3:2	0x0001	Inicio STROBE	
Determina el punto de tiempo cuando es válida la luz estroboscópica			
0 - Primer disparo			
1 - Inicio de la exposición simultanea			
2 - Ancho de obturación			
3 - Segundo disparador			
1:0	0x0002	Fin STROBE	
Determina el punto de tiempo cuando es negada la luz estroboscópica.			
R32: 0 (R0x020)	15:0	0x0040	Modo leer 2
	15	0x0000	Espejo fila
	14	0x0000	Espejo columna
	13	0x0000	Reservado
	12	0x0000	Mostrar columnas oscuras
Al activarse se mostraran las columnas oscuras a la izquierda de la imagen activa. Al no estar activo solo las columnas de la imagen activa se mostraran.			
	11	0x0000	Mostrar filas oscuras
Al activarse se mostraran las filas oscuras a la izquierda de la imagen activa. Al no estar activo solo las filas de la imagen activa se mostraran.			
	10:7	X	Reservado
	6	0x0001	Fila BLC
Al estar en un estado alto digitalmente compensa diferentes niveles de negro, en caso contrario digitalmente añade negro en el valor de cada pixel por defecto.			
	5	0x0000	Suma Columna
Al estar en un estado alto todos almacena los datos de la lectura de columnas. Al estar en un estado bajo no almacenara.			
	4	0x0000	Reservado
	3:0	X	Reservado
R34: 0 (R0x022)	15:0	0x0000	Modo dirección de fila
	15	X	Reservado
	14:12	0x0000	Reservado
	11	X	Reservado
	10:8	0x0000	Reservado
	7:6	X	Reservado
	5:4	0x0000	Reservado
	3	X	Reservado
	2:0	0x0000	Salto de filas

Valor decimal 1 = Salto por dos filas Valor decimal 2 = Salto por tres filas			
REGISTRO #	Bits	Valor por defecto	Descripción
R35: 0 (R0x023)	15:0	0x0000	Modo dirección de columna
	15	X	Reservado
	14:12	0x0000	Reservado
	11	X	Reservado
	10:8	0x0000	Reservado
	7:6	X	Reservado
	5:4	0x0000	Reservado
	3	X	Reservado
	2:0	0x0000	Salto de columnas
Valor decimal 1 = Salto por dos columnas Valor decimal 2 = Salto por tres columnas			
R36: 0 (R0x024)	15:0	0x0002	Reservado
R39: 0 (R0x027)	15:0	0x000B	Reservado
R41: 0 (R0x029)	15:0	0x0481	Reservado
R42: 0 (R0x02A)	15:0	0x1086	Reservado
R43: 0 (R0x02B)	15:0	0x0008	Ganancia Green1
	15	X	Reservado
	14:8	0x0000	Green 1 Ganancia digital. Valor decimal entre 0 y 120.
	7	X	Reservado
	6	0x0000	Green 1 Multiplicador analógico
	5:0	0x0008	Green 1 Ganancia analógica. Valor decimal entre 8 y 63
R44: 0 (R0x02C)	15:0	0x0008	Ganancia Blue
	15	X	Reservado
	14:8	0x0000	Blue Ganancia digital. Valor decimal entre 0 y 120.
	7	X	Reservado
	6	0x0000	Blue Multiplicador analógico
	5:0	0x0008	Blue Ganancia analógica. Valor decimal entre 8 y 63.
R45: 0 (R0x02D)	15:0	0x0008	Ganancia Red
	15	X	Reservado
	14:8	0x0000	Red Ganancia digital. Valor decimal entre 0 y 120.
	7	X	Reservado
	6	0x0000	Red Multiplicador analógico
	5:0	0x0008	Red Ganancia analógica. Valor decimal entre 8 y 63.
R46: 0 (R0x02E)	15:0	0x0008	Ganancia Green2
	15	X	Reservado
	14:8	0x0000	Green 2 Ganancia digital. Valor decimal entre 0 y 120.
	7	X	Reservado
	6	0x0000	Green 2 Multiplicador analógico
	5:0	0x0008	Green 2 Ganancia analógica. Valor decimal entre 8 y 63
R60: 0 (R0x03C)	15:0	0x1010	Reservado
R61: 0 (R0x03D)	15:0	0x0005	Reservado
R62: 0 (R0x03E)	15:0	0x80C7	Reservado
R63: 0 (R0x03F)	15:0	0x0004	Reservado

R64: 0 (R0x040)	15:0	0x0007	Reservado
R65: 0 (R0x041)	15:0	0x0000	Reservado
REGISTRO #	Bits	Valor por defecto	Descripción
R66: 0 (R0x042)	15:0	0x0003	Reservado
R67: 0 (R0x043)	15:0	0x0003	Reservado
R68: 0 (R0x044)	15:0	0x0203	Reservado
R69: 0 (R0x045)	15:0	0x1010	Reservado
R70: 0 (R0x046)	15:0	0x1010	Reservado
R71: 0 (R0x047)	15:0	0x1010	Reservado
R72: 0 (R0x048)	15:0	0x0010	Reservado
R73: 0 (R0x049)	15:0	0x00A8	Fila Negro target Nivel de calibración de negro en las filas.
R74: 0 (R0x04A)	15:0	0x0010	Reservado
R75: 0 (R0x04B)	15:0	0x0028	Fila Negro Offset Compensación digital añadida a todos los valores de pixeles de la imagen. Valor decimal entre 0 y 4095.
R76: 0 (R0x04C)	15:0	0x0010	Reservado
R77: 0 (R0x04D)	15:0	0x2020	Reservado
R78: 0 (R0x04E)	15:0	0x1010	Reservado
R79: 0 (R0x04F)	15:0	0x0014	Reservado
R80: 0 (R0x050)	15:0	0x8000	Reservado
R81: 0 (R0x051)	15:0	0x0007	Reservado
R82: 0 (R0x052)	15:0	0x8000	Reservado
R83: 0 (R0x053)	15:0	0x0007	Reservado
R84: 0 (R0x054)	15:0	0x0008	Reservado
R86: 0 (R0x056)	15:0	0x0020	Reservado
R87: 0 (R0x057)	15:0	0x0004	Reservado
R88: 0 (R0x058)	15:0	0x8000	Reservado
R89: 0 (R0x059)	15:0	0x0007	Reservado
R90: 0 (R0x05A)	15:0	0x0004	Reservado
R91: 0 (R0x05B)	15:0	0x0001	BLC Tamaño de muestra Si se establece, el cálculo "promedio móvil" en el algoritmo de BLC utilizará un tamaño de muestra de 32 bits. En caso contrario se utilizara un tamaño de muestra 1 bit, es decir nivel de negro de cada trama se considerará independiente de otros fotogramas.
R92: 0 (R0x05C)	15:0 15:12 11: 8 7:0	0x005A X 0x0000 0x005A	BLC Ajuste 1 Reservado BLC Delta Amortiguación Ajuste que se aplica a la magnitud del delta, por lo que un valor positivo de amortiguación se restará de un delta positivo y se sumara a un delta negativo. Las escrituras son sincronizadas con los límites de trama. Valores decimales entre -8 y 7. BLC DAC Tiempo de adaptación El número de ciclos de reloj que tarda un ajuste en ejecutarse. Se utiliza para configurar el algoritmo de muestra rápida. Después de establecer un valor de calibración en modo de muestra rápida, (valor*2) ciclos de reloj transcurrirán antes de tomar la siguiente muestra. Las escrituras estas sincronizadas para enmarcar límites. Valor decimal entre 0 y 255.
R93: 0 (R0x05D)	15:0 15	0x2D13 X	BLC Umbrales delta Reservado

	14:8	0x002D	BLC Umbral delta alto. Valor decimal entre 0 y 127.
	7	X	Reservado
	6:0	0x0013	BLC Umbral delta bajo. Valor decimal entre 0 y 127.
R94: 0 (R0x05E)	15:0	0x41FF	BLC Ajuste 2
	15	X	Reservado
	14:12	0x0004	BLC tamaño de paso. Valor decimal entre 0 y 4.
	11:9	X	Reservado
	8:0	0x01FF	BLC Ajuste máximo
El ajuste máximo (positivo o negativo) que el delta BLC para hacer el desplazamiento analógico. Valor decimal entre 1 y 511.			
R95: 0 (R0x05F)	15:0	0x231D	Reservado
R96: 0 (R0x060)	15:0	0x0020	Reservado
R97: 0 (R0x061)	15:0	0x0020	Reservado
R98: 0 (R0x062)	15:0	0x0000	Reservado
R99: 0 (R0x063)	15:0	0x0020	Reservado
R100: 0 (R0x064)	15:0	0x0020	Reservado
R112: 0 (R0x070)	15:0	0x0067	Reservado
R113: 0 (R0x071)	15:0	0xA700	Reservado
R114: 0 (R0x072)	15:0	0xA700	Reservado
R115: 0 (R0x073)	15:0	0X0C00	Reservado
R116: 0 (R0x074)	15:0	0x0600	Reservado
R117: 0 (R0x075)	15:0	0x5617	Reservado
R118: 0 (R0x076)	15:0	0x000B	Reservado
R119: 0 (R0x077)	15:0	0x000B	Reservado
R120: 0 (R0x078)	15:0	0x000B	Reservado
R121: 0 (R0x079)	15:0	0x000B	Reservado
R122: 0 (R0x07A)	15:0	0x000B	Reservado
R123: 0 (R0x07B)	15:0	0x000B	Reservado
R124: 0 (R0x07C)	15:0	0x000B	Reservado
R125: 0 (R0x07D)	15:0	0x000B	Reservado
R126: 0 (R0x07E)	15:0	0x000B	Reservado
R127: 0 (R0x07F)	15:0	0x000B	Reservado
R128: 0 (R0x080)	15:0	0x000B	Reservado
R129: 0 (R0x081)	15:0	0x000B	Reservado
R130: 0 (R0x082)	15:0	0x000B	Reservado
R131: 0 (R0x083)	15:0	0x000B	Reservado
R132: 0 (R0x084)	15:0	0x000B	Reservado
R134: 0 (R0x086)	15:0	0x000B	Reservado
R135: 0 (R0x087)	15:0	0x000B	Reservado
R144: 0 (R0x090)	15:0	0x000B	Reservado
R255: 0 (R0x0FF)	15:0	0x1800	Version Chip Altera. Solo lectura.

Tabla 6. Descripción de los registros de la cámara TRDB-D5M

4.2.1.3 MODOS DE LECTURA

4.2.1.3.1 SUBMUESTREO

Por defecto, la Resolución de la imagen de salida es el ancho y la altura del campo de visión, esta resolución se puede reducir mediante dos métodos: Por saltos y agrupación.

4.2.1.3.1.1 POR SALTOS

En modo de salto no se tomaran muestras de los pixeles por filas y columnas, dando como resultado una imagen de menor resolución. Este salto se puede activar por separado para filas y columnas.

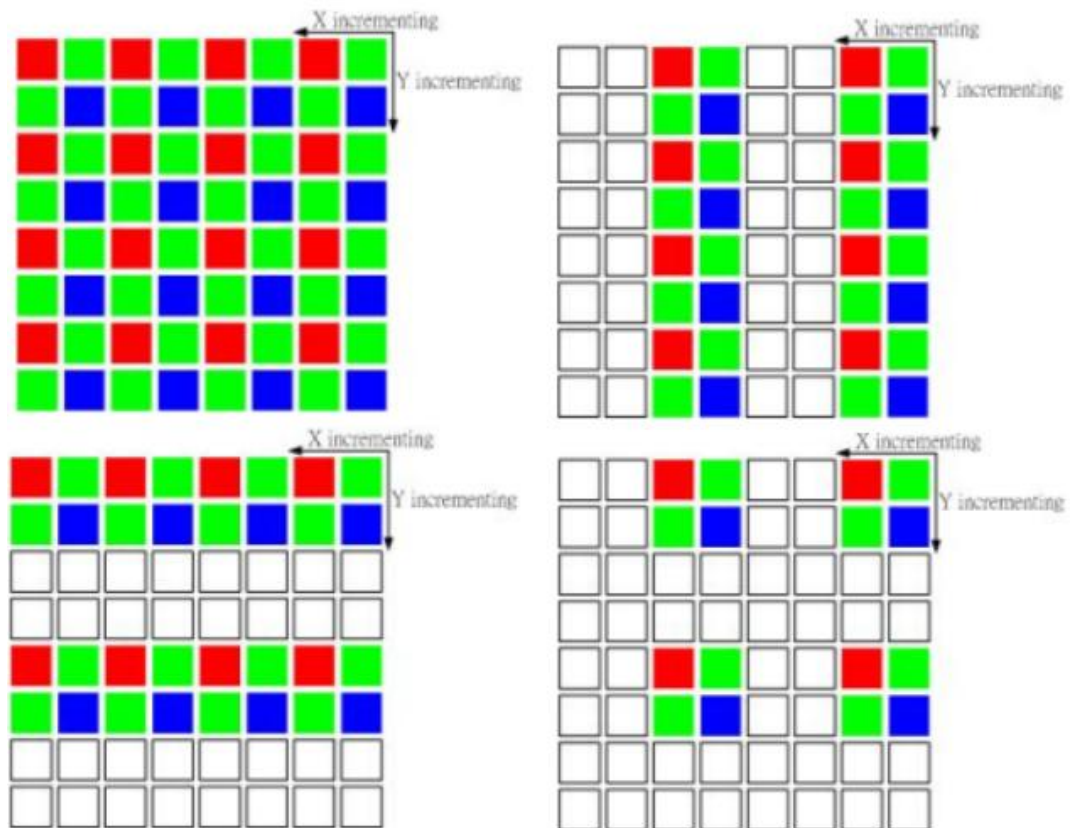


Figura 20. Sub-muestreo por saltos²⁰

²⁰ TERASIC. THDB-D5M, Terasic D5M Hardware Specification [Fotografía]. Artículo. 2008-04-18. Disponible en internet: <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse467/08au/labs/Resources/THDB-D5M_Hardware%20specification.pdf>

En la Figura 20 se aprecia la lectura de los píxeles en completa resolución y como se realiza el proceso de salto por filas y columnas, dando como resultado la imagen a menor resolución.

4.2.1.3.1.1 POR AGRUPACION

Reduce la resolución mediante la combinación de los píxeles adyacentes del mismo color arrojando como dato de salida el promedio de los píxeles.

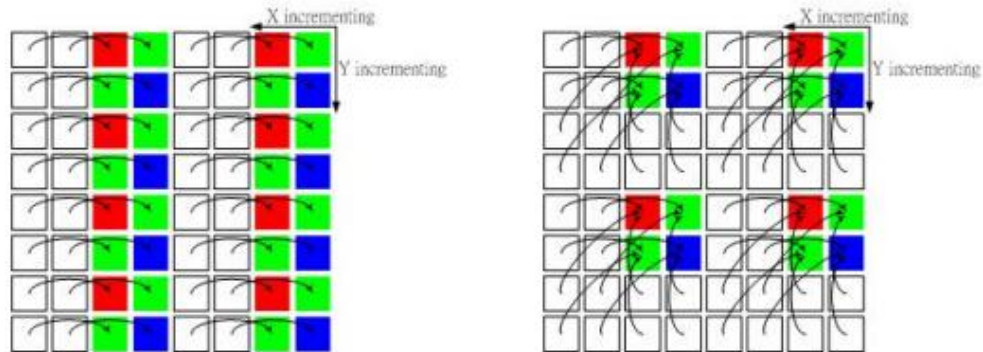


Figura 21. Sub-muestreo por agrupación²¹

4.2.1.4 SINCRONIZACION DE DATOS

Los registros se escriben y se leen desde la TRDB-D5M a través del bus serial de dos hilos. La TRDB-D5M actúa como esclavo controlado por el reloj (SCLK), que es accionado por el maestro (FPGA).

La comunicación se basa en una secuencia de lectura o de escritura que comienza cuando el maestro envía un bit de inicio. Después el maestro envía una dirección de 8 bits del dispositivo esclavo, el último bit de la dirección determina si la solicitud es una lectura o una escritura, donde un "0" indica una escritura y un "1" indica una lectura. El dispositivo esclavo reconoce su dirección enviando un bit de confirmación de nuevo al maestro. Si la solicitud era una escritura, el maestro transfiere la dirección del registro de 8 bits a la que la nueva escritura debe tomar lugar. El esclavo envía un bit de reconocimiento para indicar que el registro de dirección ha sido recibido. El maestro luego transfiere los datos de ocho bits a la vez, con el esclavo enviando un bit de reconocimiento después de cada 8 bits. La TRDB-D5M utiliza datos de 16 bits para sus registros internos, por lo que requiere dos transferencias de 8 bits. Después que los 16 bits son transferidos, la dirección de registro se incrementa automáticamente, por lo que los próximos 16 bits se escriben a la siguiente dirección de registro.

²¹ TERASIC. THDB-D5M, Terasic D5M Hardware Specification [Fotografía]. Artículo. 2008-04-18. Disponible en internet: <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse467/08au/labs/Resources/THDB-D5M_Hardware%20specification.pdf>

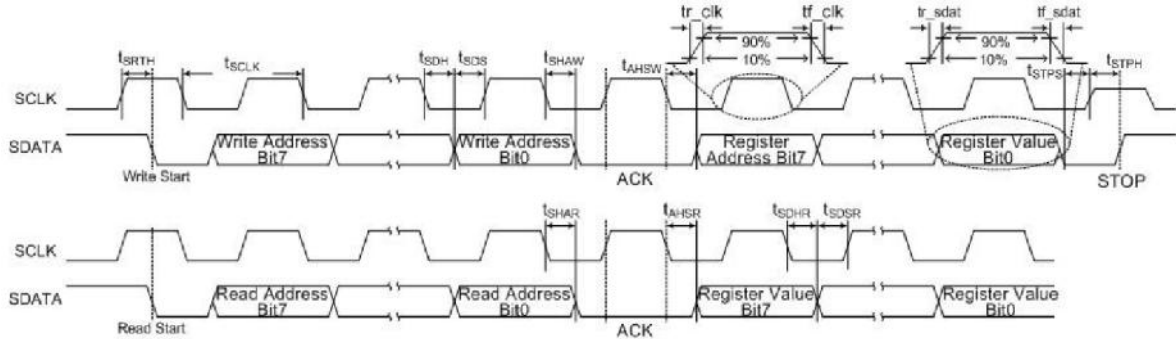


Figura 22. Parámetros de temporización del bus serial de dos hilos²²

4.2.1.5 CONEXIÓN DE LA CÁMARA TRDB-D5M

La cámara tiene un conector de 40 pines que se puede acoplar directamente al GPIO de la placa FPGA DE0-Nano o por medio de una correa expansiva.

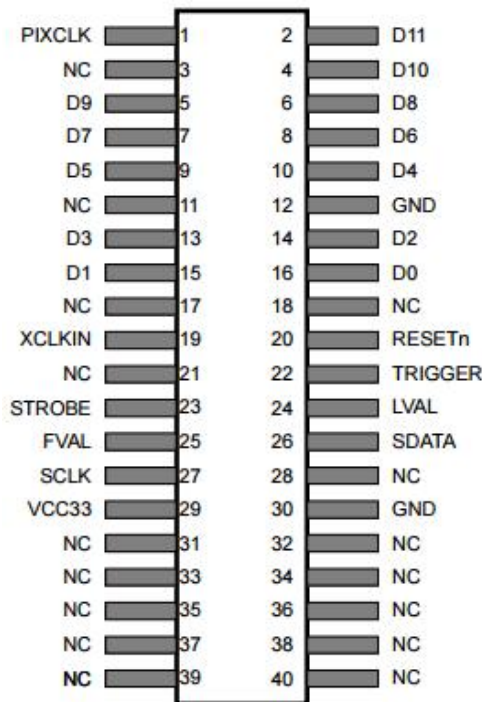


Figura 23. Pines de la cámara TRDB-D5M²³

²² TERCASIC. TRDB-D5M. 5 Mega Pixel Digital Camera Development Kit [Fotografía]. 2014-07-01. Disponible en internet: <https://www.terasic.com.tw/attachment/archive/281/TRDB_D5M_UserGuide.pdf>

²³ TERCASIC. TRDB-D5M. 5 Mega Pixel Digital Camera Development Kit [Fotografía]. 2014-07-01. Disponible en internet: <https://www.terasic.com.tw/attachment/archive/281/TRDB_D5M_UserGuide.pdf>

4.2.1.6 CODIGO DE PROGRAMACION

La información de la cámara TRDB-D5M se puede encontrar fácilmente en el link (<http://goo.gl/wh84nG>) de la empresa TERASIC fabricante del producto, dentro de la información se encuentra códigos de prueba de la cámara conectándola a las FPGA. Esta información también es entregada en medio físico al momento de la compra del equipo.

El código empleado para la obtención de las imágenes de la cámara está en el anexo E (**CCD_Capture**) y el anexo F (**I2C_CCD_Config**).

```
always@(posedge iCLK)
begin
  case(LUT_INDEX)
    0 : LUT_DATA <= 24'h000000;
    1 : LUT_DATA <= Mirror_d; // Mirror Row and Columns
    2 : LUT_DATA <= {8'h09,lumi[15:0]}; // Exposure
    3 : LUT_DATA <= 24'h050000; // H_Blanking
    4 : LUT_DATA <= 24'h060019; // V_Blanking
    5 : LUT_DATA <= 24'h0A8000; // change latch
    6 : LUT_DATA <= 24'h2B0013; // Green 1 Gain
    7 : LUT_DATA <= 24'h2C009A; // Blue Gain
    8 : LUT_DATA <= 24'h2D019C; // Red Gain
    9 : LUT_DATA <= 24'h2E0013; // Green 2 Gain

    10 : LUT_DATA <= 24'hA30000; // Test blue pattern value
    11 : LUT_DATA <= 24'h111802; // PLL_m_Factor<<8+PLL_n_Divider
    12 : LUT_DATA <= 24'h120007; // PLL_pl_Divider
    13 : LUT_DATA <= 24'h100053; // set USE PLL

    14 : LUT_DATA <= 24'h980000; // disble calibration |

    15 : LUT_DATA <= 24'hA00000; // Test pattern control
    16 : LUT_DATA <= 24'hA10000; // Test green pattern value
    17 : LUT_DATA <= 24'hA20AAA; // Test red pattern value

    18 : LUT_DATA <= sensor_start_row ; // set start row
    19 : LUT_DATA <= sensor_start_column ; // set start column

    20 : LUT_DATA <= sensor_row_size; // set row size
    21 : LUT_DATA <= sensor_column_size; // set column size
    22 : LUT_DATA <= sensor_row_mode; // set row mode in bin mode
    23 : LUT_DATA <= sensor_column_mode; // set column mode in bin mode
    24 : LUT_DATA <= 24'h4901A8; // row black target
  default:LUT_DATA <= 24'h000000;
  endcase
end
```

Figura 24. Configuración de los registros de la cámara TRDB-D5M

En el módulo CCD_Capture se encuentran los registros que guardan la información obtenida por el sensor sensible a la luz y que tienen acceso a los datos que arroja la cámara, en el módulo I2C_CCD_Config (Figura 24) se hace el control por medio de los registros de los componentes de la cámara digital, como son el obturador, el tiempo de exposición del sensor, el rango de exposición entre otros.

4.2.2 CONFIGURACIÓN DE LA PANTALLA

La pantalla recibe los 24 bits RGB en paralelo, formando una imagen de 800 x 480 pixeles de forma progresiva, este método es el mismo que utiliza la cámara para tomar la imagen (sección 4.2.1.1). La pantalla TRDB-LTM se utiliza solo para visualizar la trayectoria del robot.

4.2.2.1 CONEXIÓN DE LA PANTALLA TRDB-LTM

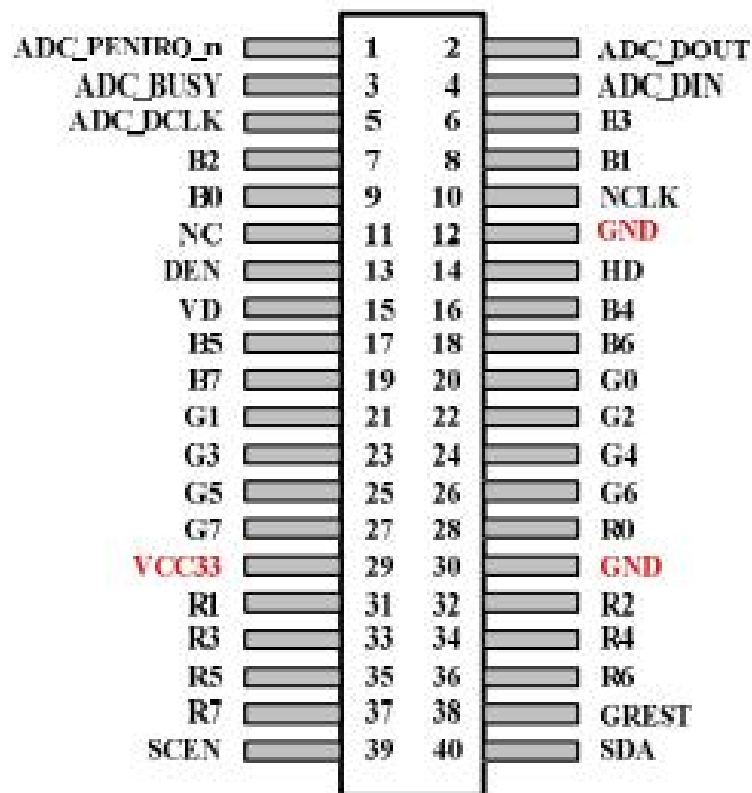


Figura 25. Pines de la pantalla TRDB-LTM²⁴

²⁴ TERASIC. TRDB_LTM, Inch Digital Touch Panel Development Kit [Fotografía]. Artículo. 2007-11-09. Disponible en internet: <http://www.terasic.com.tw/attachment/archive/237/TRDB_LTM_UserGuide_v1.22.pdf>

La cámara tiene un conector de 40 pines que se puede acoplar por medio de una correa expansiva al GPIO de la placa FPGA DE0-Nano.

Pin	Nombre	Dirección	Descripción
1	ADC_PENIRQ_n	salida	ADC pluma de interrupción
2	ADC_DOUT	salida	ADC data out de la interfaz de serie
3	ADC_BUSY	salida	ADC interfaz serial concurrencia
4	ADC_DIN	entrada	ADC data in de la interfaz de serie
5	ADC_DCLK	entrada	ADC / LCD reloj de la interfaz en serie
6	B3	entrada	Bus LCD bit de datos azul 3
7	B2	entrada	Bus LCD bit de datos azul 2
8	B1	entrada	Bus LCD bit de datos azul 1
9	B0	entrada	Bus LCD bit de datos azul 0
10	NCLK	entrada	Señal de reloj LCD
11	NC	N / A	N / A
12	GND	N / A	GND
13	DEN	entrada	Datos RGB LCD Activador
14	HD	entrada	LCD de sincronización horizontal
15	VD	Entrada	LCD sincronización vertical
16	B4	Entrada	LCD bit bus de datos azul 4
17	B5	Entrada	Bus LCD bit de datos azul 5
18	B6	Entrada	Bus LCD bit de datos azul 6
19	B7	Entrada	Bus LCD bit de datos azul 7
20	G0	Entrada	Bus LCD bit de datos verde 0
21	G1	Entrada	Bus LCD bit de datos verde 1
22	G2	Entrada	Bus LCD bit de datos verde 2
23	G3	Entrada	Bus LCD bit de datos verde 3
24	G4	Entrada	Bus LCD bit de datos verde 4
25	G5	Entrada	Bus LCD bit de datos verde 5
26	G6	Entrada	Bus LCD bit de datos verde 6
27	G7	Entrada	Bus LCD bit de datos verde 7
28	R0	Entrada	Bus LCD bit de datos rojo 0
29	VCC33	N / A	3.3V
30	GND	N / A	GND
31	R1	Entrada	Bus LCD bit de datos rojo 1
32	R2	Entrada	Bus LCD bit de datos rojo 2
33	R3	Entrada	Bus LCD bit de datos rojo 3
34	R4	Entrada	Bus LCD bit de datos rojo 4
35	R5	Entrada	Bus LCD bit de datos rojo 5
36	R6	Entrada	Bus LCD bit de datos rojo 6
37	R7	Entrada	Bus LCD bit de datos rojo 7
38	GREST	Entrada	Restablecimiento Global
39	SCEN	Entrada	LCD interfaz en serie de 3 hilos activar / desactiva chip ADC
40	SDA	Entrada / Salida	3 hilos LCD de datos de interfaz serial

Tabla 7. Pines de la pantalla TRDB-LTM

4.2.2.2 SINCRONIZACION DE DATOS

La pantalla contiene un controlador LCD IC que reconoce el inicio de transferencia de datos en el flanco descendente de SCEN. Al configurar la instrucción los valores de ajuste se introducen a través de SDA.

Los primero 6 bits (A5...A0) especifican la dirección del registro. El siguiente bit significa si es lectura o escritura, "0" escritura, "1" lectura. Finalmente, los últimos 8 bits son para el ajuste de datos (D0...D7). La dirección y los datos se transfieren desde el MSB al LSB secuencialmente. Los datos se escriben en el registro de la dirección asignada, el "Fin de transferencia se detecta" después de los 16 ciclos y aumenta SCL. Los datos no se aceptan si hay menos o más de 16 ciclos.

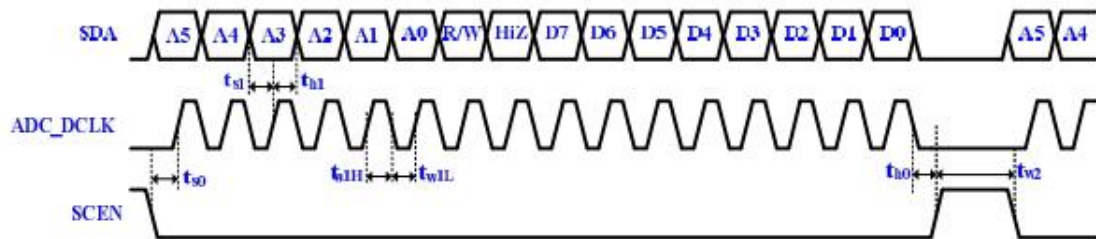


Figura 26. Sincronización de datos de la pantalla y la FPGA²⁵

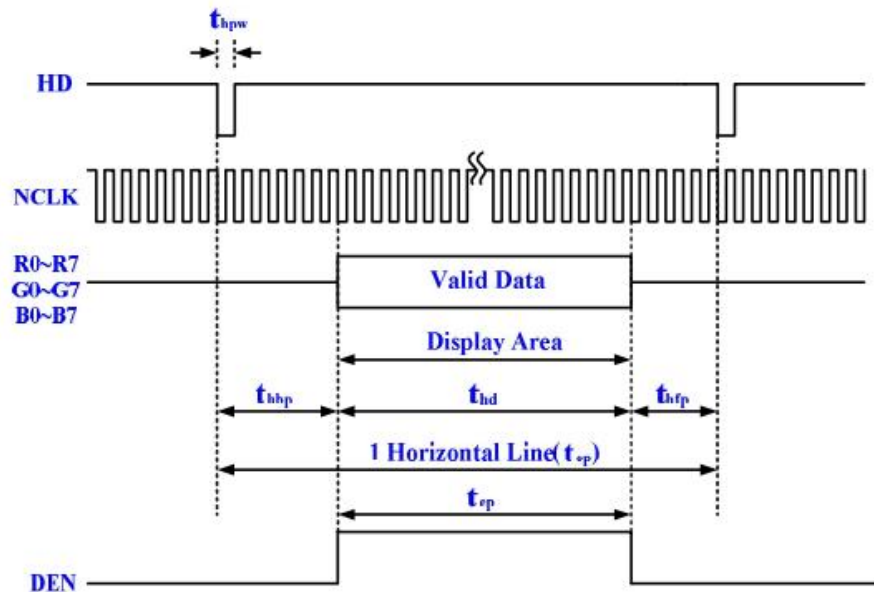


Figura 27. Sincronización de datos de la pantalla y la FPGA²⁶

²⁵ Terasic. TRDB_LTM, Inch Digital Touch Panel Development Kit [Fotografía]. Artículo. 2007-11-09. Disponible en internet: <http://www.terasic.com.tw/attachment/archive/237/TRDB_LTM_UserGuide_v1.22.pdf>

²⁶ Terasic. TRDB_LTM, Inch Digital Touch Panel Development Kit [Fotografía]. Artículo. 2007-11-09. Disponible en internet: <http://www.terasic.com.tw/attachment/archive/237/TRDB_LTM_UserGuide_v1.22.pdf>

En la Figura 27 se observa cómo se realiza la sincronización horizontal (HD) de la imagen a mostrar, inicia con un pulso de corta duración t_{hpw} , que significa el final de una fila de datos y comienzo del siguiente. Los datos RGB solo son leídos cuando el activador DEN este en un estado lógico alto, recordar que la resolución de la pantalla es de 800x480.

Parámetro	Símbolo	Resolución de pantalla			Unidad
		800xRGBx480	480xRGBx272	400xRGBx240	
NCLK Frecuencia	FNCLK	33.2	9	8.3	MHz
Datos válidos Horizontal	t_{hd}	800	480	400	NCLK
1 Línea horizontal	t_h	1056	525	528	NCLK
Ancho de Pulso HSYNC	Min.	1			NCLK
	Typ.	-			
	Max.	-			
Hsync back	t_{hpb}	216	43	108	NCLK
Hsync front	t_{hfp}	40	2	20	NCLK
Tiempo Habilitador DEN	t_{ep}	800	480	400	NCLK

Tabla 8. Parámetros de configuración horizontal de la pantalla TRDB-LTM

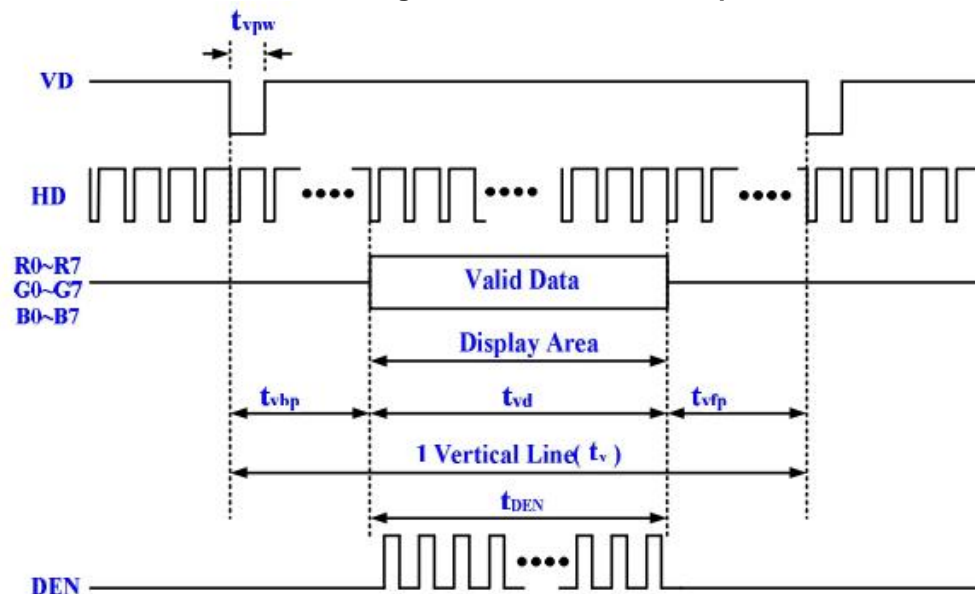


Figura 28. Sincronización de datos de la pantalla y la FPGA²⁷

²⁷ TERASIC. TRDB_LTM, Inch Digital Touch Panel Development Kit [Fotografía]. Artículo. 2007-11-09. Disponible en internet: <http://www.terasic.com.tw/attachment/archive/237/TRDB_LTM_UserGuide_v1.22.pdf>

La sincronización vertical se activa con un pulso de corta duración t_{vpw} , los datos RGB solo son leídos cuando el activador DEN y la sincronización horizontal estén en un estado lógico alto.

Parámetro	Símbolo	Resolución de pantalla			Unidad
		800xRGBx480	480xRGBx272	400xRGBx240	
Datos válidos vertical	t_{vd}	480	272	240	H
Periodo Vertical	t_v	525	286	262	H
Ancho de Pulso VSYNC	Min.	1			H
	Typ.	-			
	Max.	-			
Vertical back	t_{vbp}	35	12	20	H
Vertical front	t_{vfp}	10	2	2	H
Borrado Vertical	t_{vb}	45	14	22	H
Tiempo Habilitador DEN	T_{DEN}	480	272	240	H

Tabla 9. Parámetros de configuración vertical de la pantalla TRDB-LTM

4.2.2.3 CODIGO DE PROGRAMACION

Al igual que la cámara TRDB-D5M se puede encontrar información de la pantalla TRDB-LTM fabricada por TERASIC en el link (<http://goo.gl/vqJXvO>), en la información que suministra se encuentran códigos de prueba de la pantalla conectándola a las FPGA. Esta información también es entregada en medio físico al momento de la compra de la pantalla.

El código empleado para la visualización de la imagen se encuentra en el anexo G (**lcd_3wire_config**) y el anexo H (**touch_tcon**).

En el módulo lcd_3wire_config se encuentran los registros permiten la configuración desde la FPGA y que tienen acceso a los datos para visualizar en la pantalla, en el módulo touch_tcon se encuentra la configuración para utilizar la pantalla con la funcionalidad táctil.

4.2.3 PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN

Para obtener los niveles RGB de la imagen tomada por la cámara TRDB-D5M y procesarlos, se diseñó un módulo que retrasara los datos de salida sin que generen problemas de sincronización a la imagen mostrada en la pantalla. En la Figura 17 se muestra como se realiza el escaneo progresivo para generar una imagen, método utilizado por la cámara para obtener la imagen y por la pantalla para mostrarla.

Con la imagen efectuando un escaneo progresivo es necesario establecer un área definida para efectuar el procesamiento a la imagen, esta área se le denomina un Kernel, que es una matriz de pixeles determinada por un tamaño menor al de la imagen original.

En la Figura 29, se muestra un sistema de coordenadas para una imagen como ejemplo. El escaneo progresivo inicia en el punto (x_0, y_0) , leyendo el primer pixel, luego lee el pixel ubicado en el punto (x_1, y_0) , luego el pixel ubicado en el punto (x_2, y_0) , hasta terminar toda la fila (y_0) . Cuando finaliza una fila luego pasa a la siguiente, leyendo los puntos (x_0, y_1) , (x_1, y_1) , (x_2, y_1) sucesivamente hasta terminar la fila (y_1) . Al culminar todas las filas habrá terminado de leer todos los pixeles que comprende la imagen.

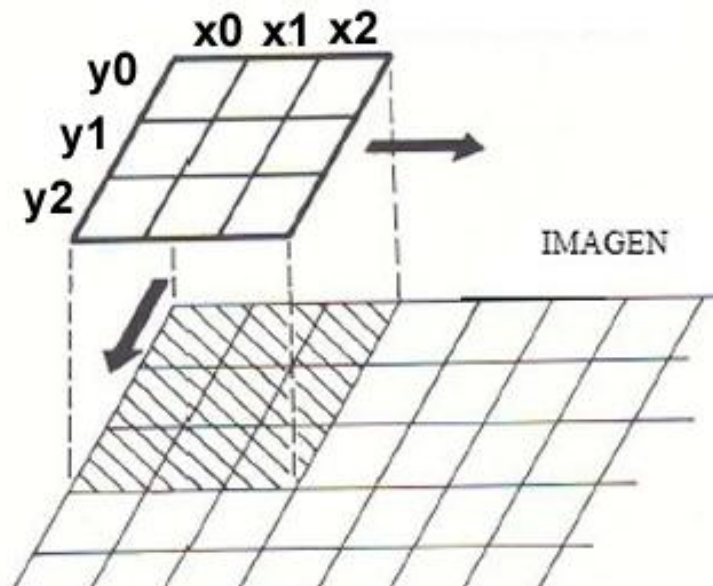


Figura 29. Ejemplo Escaneo Progresivo²⁸

²⁸ TELEDET. Percepción Remota [Fotografía]. Disponible en internet: < <http://www.teledet.com.uy/figuras/fig49.jpg> >

Para poder obtener la información de los pixeles se utilizó un módulo diseñado para generar un número N de Flip-Flop tipo D, que estén conectados en serie generando un retraso de N datos. Este módulo se puede ver en el anexo I.

El Flip-Flop tipo D cambia el estado de la salida (Q) solo si cambia el de la entrada (D), este cambio se evalúa en cada ciclo reloj.

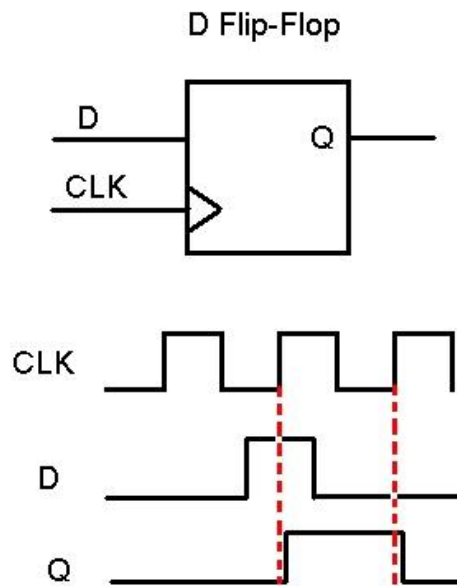


Figura 30. Flip-Flop tipo D²⁹

Al unir varios Flip-Flop se genera un retraso dado por el número de Flip-Flop que existan, en la Figura 29 se muestra un arreglo de 4 Flip-Flop tipo D. Si se tuviera un registro en paralelo de 4 bits se podría tener acceso a cada uno de los datos que pasen por los Flip-Flop por medio de derivaciones en cada una de las salidas (Q).

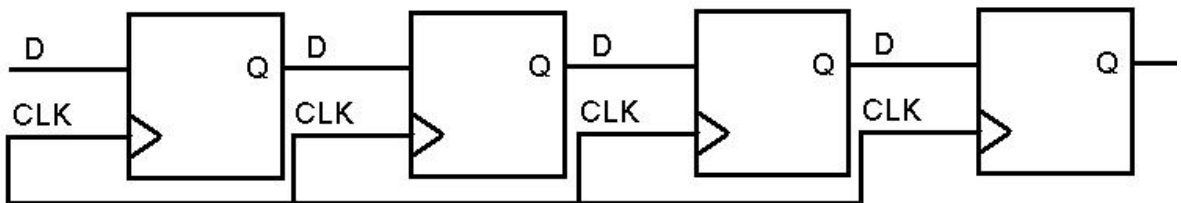


Figura 31. Arreglo de Flip-Flop tipo D

²⁹ SISTEMAS EMBEBIDOS UTP. Just another blog WordPress.com [Fotografía]. Disponible en internet: < <https://utpembedded.files.wordpress.com/2012/04/fig1.jpg> >

Al poder escoger el número de Flip-Flop se escogerá directamente el número de datos que quisiera ver de un registro en serie.

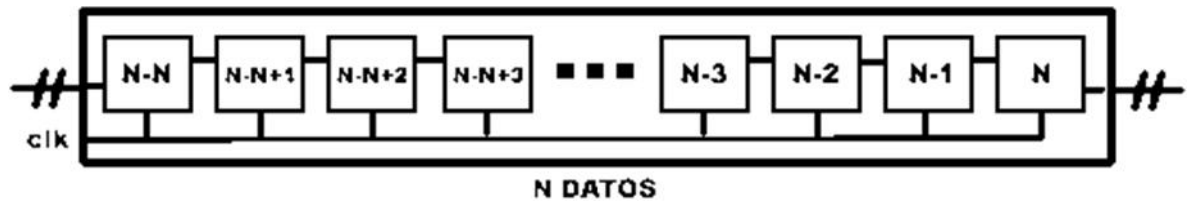


Figura 32. Retardo de N datos

Este lector de registros en serie está ubicado entre el módulo **lcd_3wire_config**, la pantalla tiene una componente horizontal de 800 pixeles, por lo tanto se hace crea delay (retardo) de 800 datos, además de pusieron en serie 3 delay para tener acceso a los datos de tres columnas a la vez, tomando así una matriz de pixeles de 3x3, este módulo se puede ver en el anexo J.

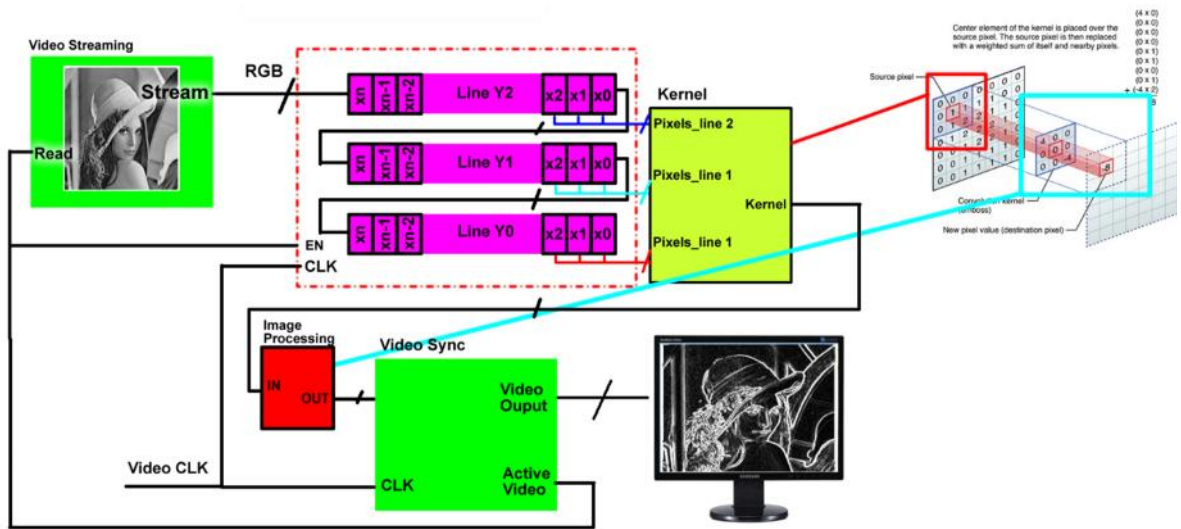


Figura 33. Lectura de matrices de pixeles

4.2.3.1 DETECCIÓN DE NIVELES RGB

De cada pixel se obtienen un vector de 24 bits, entre los bits [23:16] se encuentran los datos rojos, entre [15:8] el promedio de datos verdes y entre [7:0] los datos azules. En cada una de las derivaciones del módulo linebuffer_3line (anexo J) se hace la lectura de estos datos.

Al concatenar los 3 vectores de 8 bits de cada color se obtiene la gama completa del estándar RGB, $256 \times 256 \times 256 = 16'777.216$ de colores.

COLOR	Valor (hex)
ROJO	FF0000
VERDE	00FF00
AZUL	0000FF

Tabla 10. Valores hexadecimales de los colores Rojo, Verde y Azul.

El color blanco es la mezcla de todos los colores y el color negro es la ausencia de color por lo tanto los valores hexadecimales son:

COLOR	Valor (hex)
BLANCO	FFFFFF
NEGRO	000000

Tabla 11. Valores hexadecimales del color blanco y negro

4.2.3.2 OPERACIONES MATEMÁTICAS

Los valores recibidos de la lectura de la imagen hecha por la cámara y mostrados en la pantalla son manipulados para obtener un valor que ejercerá control sobre el robot. La Figura 32 muestra la ubicación de cuatro zonas en la imagen que se visualiza en la pantalla TRDB-LTM. Las zonas A, B y C consisten en una matriz de pixeles de 150×133 , 19950 pixeles que se promedian cambiando el color del cuadro que lo rodea por el color del valor promedio. La zona N también actuará como sensor y servirá para indicar al robot si existe algún cambio de color.

Para hacer esta operación se utiliza el módulo **div_module** del **Mega Wizard** de Quartus II.

Para poder delimitar estas zonas se determinan las coordenadas de cada uno de los cuadros para dibujar cada una de las líneas se sus lados, al obtener el kernel del cuadro de pixeles será proyectado en cada una de las líneas dibujadas.

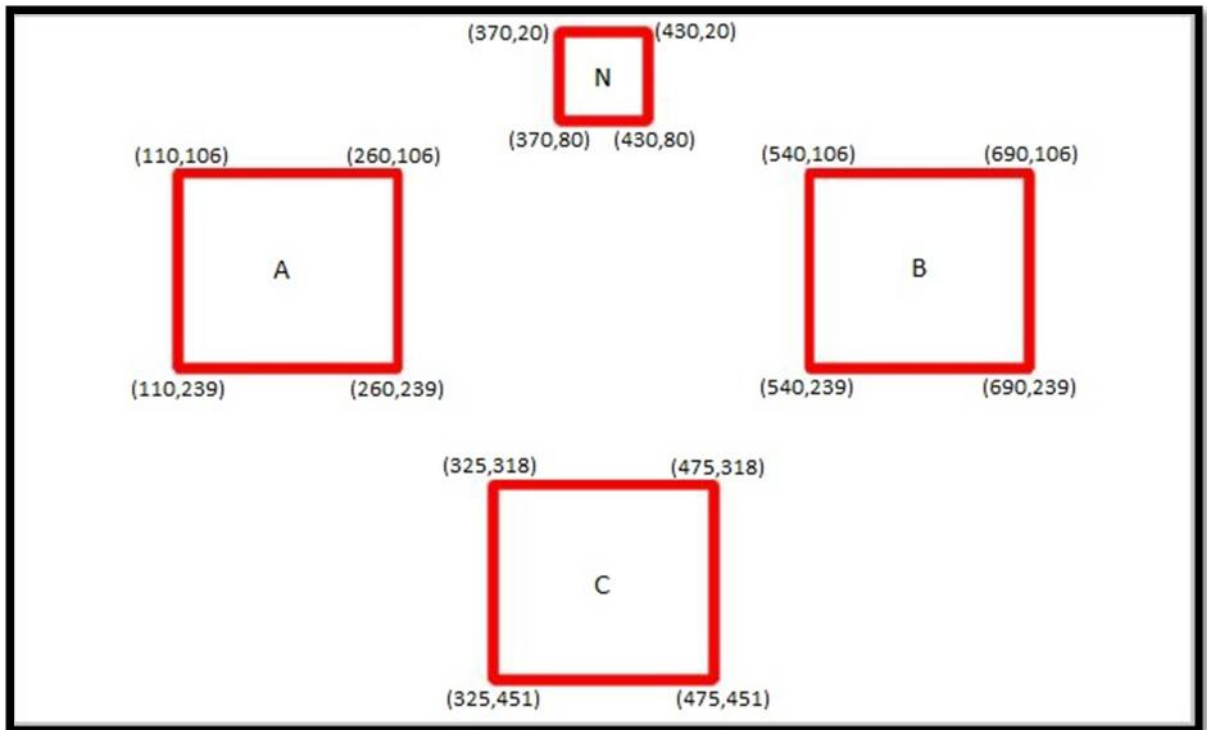


Figura 34. Zonas de adquisición de datos

El promedio de los cuadros indicara la dirección que debe seguir el robot para no salirse de la línea. Como el robot se mueve bajo una superficie blanca, el valor "0" lógico lo leerá cuando el promedio del pixeles del cuadro se acerque a un valor blanco.

La FPGA controla con la lógica mostrada en tabla 12 los movimientos del robot, habilitando o no los motores, la señal que enviara al control PWM para mover el motor será la lógica dada por el control de los cuadros de color. También muestra cuando habilita el motor izquierdo o derecho o los dos, según sea la situación que presente el robot.

Esta tabla ilustra una simulación de las diferentes situaciones que enfrentaría el robot para tomar una decisión, si se encuentra ubicado en el centro de la línea, el cuadro C estará activo indicando el color que este analizando y la FPGA enviara la señal de control habilitando los motores para que se mueva el robot en la dirección frontal, así el robot actuara de forma autónoma según la posición en la que se encuentre guiándose por la trayectoria trazada.

CUADROS			MOTOR IZQ	MOTOR DER	IMAGEN
A	B	C			
0	0	0	0	0	
0	0	1	1	1	
0	1	0	1	0	
0	1	1	1	0	
1	0	0	0	1	
1	0	1	0	1	
1	1	0	0	0	
1	1	1	1	1	

Tabla 12. Control de las zonas para el seguimiento de la línea

4.2.4 CONTROL PWM

El módulo PWM tiene una salida de 8 bits donde el valor máximo de alimentación energética de los motores serán los 8 bits en alto. El código se puede visualizar en el anexo K. La señal PWM variara la velocidad según el color que detecte en los cuadros que actúan como sensores de color. La tabla 13 muestra el voltaje según el valor binario que obtendrá la señal PWM.

H	Dec	Binario	Voltaje
FF	255	11111111	5,00
EF	239	11101111	4,68
DE	222	11011110	4,35
CD	205	11001101	4,02
BC	188	10111100	3,68
AB	171	10101011	3,35
9A	154	10011010	3,02
89	137	10001001	2,69
79	121	01111001	2,37
68	104	01101000	2,04
56	86	01010110	1,69
46	70	01000110	1,37
35	53	00110101	1,04
24	36	00100100	0,71
14	20	00010100	0,39
A	10	00001010	0,20

Tabla 13. Voltaje controlado por PWM

Variando el voltaje en los motores se controla la velocidad del motor, siendo la salida PWM bx11111111 el mayor voltaje que recibirán los motores en este caso 5v. Para diferenciar las velocidades el color azul guiara el robot a su máxima velocidad, seguido por el color verde que lo guiara a una velocidad media y la roja será la velocidad más baja.

COLOR	Avanzar	Voltaje A	Detener	Voltaje D
ROJO	01100110	2.0 v	00110011	1.0 v
VERDE	10110011	3.5 v	10000000	2.5 v
AZUL	11111111	5.0 v	11001100	4.0 v

Tabla 14. Voltaje controlado por PWM para cada color

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para poner en funcionamiento el robot se diseñó una pista donde la trayectoria roja se encontrara en las curvas pronunciadas, el color verde en las curvas suaves y el color azul en las rectas o curvas muy suaves.

Para realizar esta pista se utilizó cinta aislante de colores rojo, verde y azul.

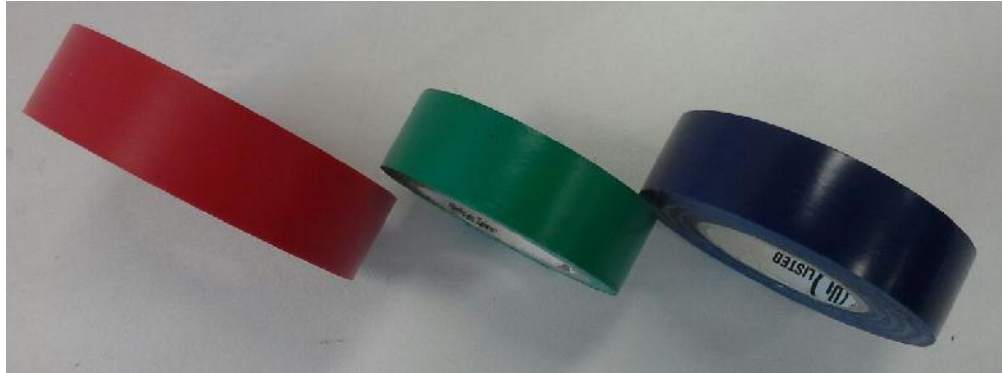


Figura 35. Cinta aislante de colores

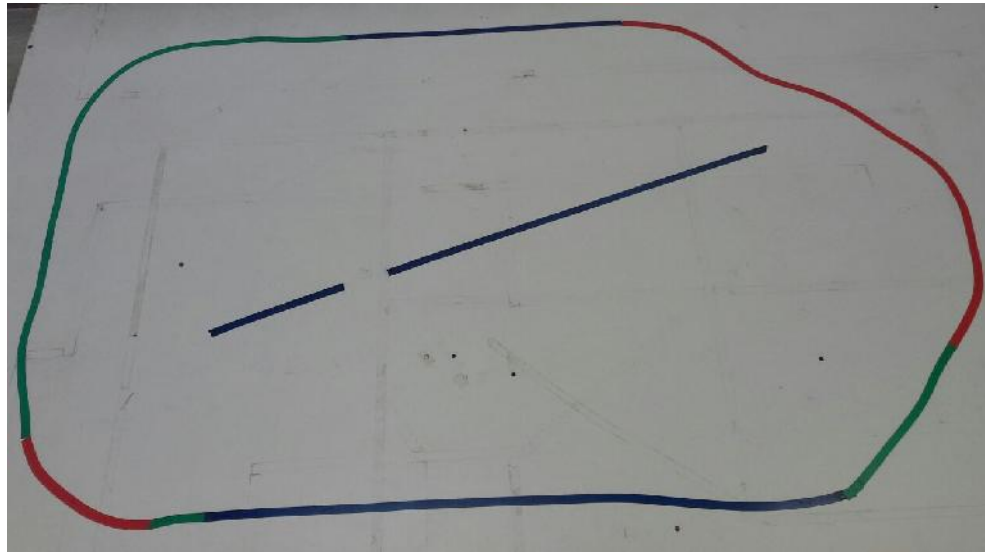


Figura 36. Pista de colores

En la pista se identificaron los niveles de color que leía la FPGA de los colores de las cintas. Arrojando los resultados de la tabla 15 para color rojo, tabla 16 color verde y tabla 17 color azul.

DATOS RGB EN LA PISTA	CINTA ROJA								
	HEXAGESIMAL			BINARIO			DECIMAL		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B
1	FC	5D	4B	11111100	1011101	1001011	252	93	75
2	FF	65	52	11111111	1100101	1010010	255	101	82
3	FF	62	50	11111111	1100010	1010000	255	98	80
4	FF	62	51	11111111	1100010	1010001	255	98	81
5	FF	6A	55	11111111	1101010	1010101	255	106	85
6	FF	69	54	11111111	1101001	1010100	255	105	84
7	FF	71	5B	11111111	1110001	1011011	255	113	91
8	FF	5D	4B	11111111	1011101	1001011	255	93	75
9	FF	7E	65	11111111	1111110	1100101	255	126	101

PROMEDIO	FE	67	53	11111110	1100111	1010011	254,7	103,7	83,78
MENOR	FC	5D	4B	11111100	1011101	1001011	252	93	75
MAYOR	FF	7E	65	11111111	1111110	1100101	255	126	101

Tabla 15. Nivel RGB de la cinta roja en la pista

DATOS RGB EN LA PISTA	CINTA VERDE								
	HEXAGESIMAL			BINARIO			DECIMAL		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B
1	8A	B9	85	10001010	10111001	10000101	138	185	133
2	8B	B7	83	10001011	10110111	10000011	139	183	131
3	81	57	74	10000001	1010111	1110100	129	87	116
4	6C	84	5E	1101100	10000100	1011110	108	132	94
5	76	A0	6F	1110110	10100000	1101111	118	160	111
6	80	A9	77	10000000	10101001	1110111	128	169	119
7	70	8E	66	1110000	10001110	1100110	112	142	102
8	6B	8D	65	1101011	10001101	1100101	107	141	101
9	7F	A5	75	1111111	10100101	1110101	127	165	117

PROMEDIO	7A	97	71	1111010	10010111	1110001	122,9	151,6	113,8
MENOR	6B	57	5E	1101011	1010111	1011110	107	87	94
MAYOR	8B	B9	85	10001011	10111001	10000101	139	185	133

Tabla 16. Nivel RGB de la cinta verde en la pista

DATOS RGB EN LA PISTA	CINTA AZUL								
	HEXAGESIMAL			BINARIO			DECIMAL		
	R	G	B	R	G	B	R	G	B
1	55	59	84	1010101	1011001	10000100	85	89	132
2	51	46	60	1010001	1000110	1100000	81	70	96
3	53	4C	73	1010011	1001100	1110011	83	76	115
4	4E	44	5F	1001110	1000100	1011111	78	68	95
5	49	44	64	1001001	1000100	1100100	73	68	100
6	4F	44	5F	1001111	1000100	1011111	79	68	95
7	49	43	5E	1001001	1000011	1011110	73	67	94
8	42	3C	55	1000010	111100	1010101	66	60	85
9	5C	53	76	1011100	1010011	1110110	92	83	118

PROMEDIO	4E	48	67	1001110	1001000	1100111	78,89	72,11	103,3
MENOR	42	3C	55	1000010	111100	1010101	66	60	85
MAYOR	5C	59	84	1011100	1011001	10000100	92	89	132

Tabla 17. Nivel RGB de la cinta azul en la pista

5.1 DEMOSTRACION

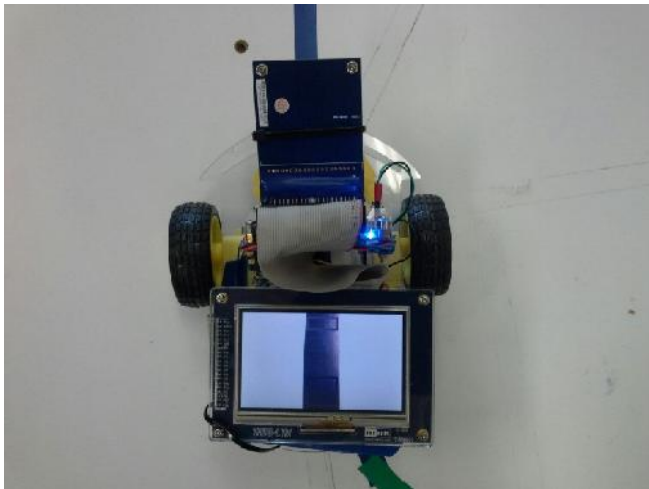


Figura 37. Ubicación del robot

En la figura 37, se aprecia la ubicación del robot en el centro de la línea azul, en esta ubicación los dos motores avanzarán a la mayor velocidad que alcanza el robot.

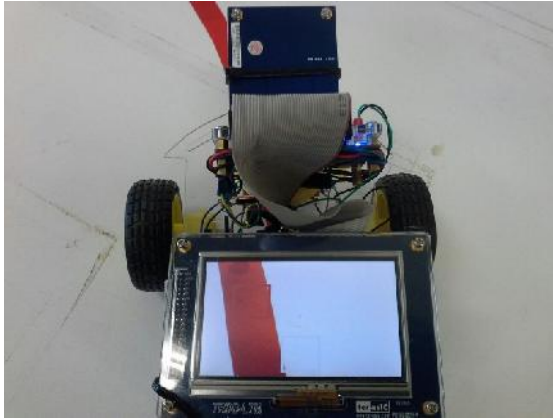


Figura 38. Ubicación del robot

En la figura 38, se aprecia la ubicación del robot a un costado de la línea roja, en esta ubicación el motor derecho avanzara de manera más rápida que el izquierdo buscando mantener al robot en el centro de la línea.

En la figura 39, se aprecia la ubicación del robot a un costado de la línea roja, en esta ubicación el motor izquierdo avanzara de manera más rápida que el derecho buscando mantener al robot en el centro de la línea.

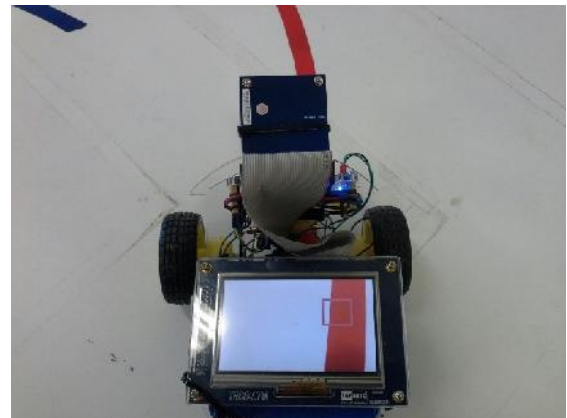


Figura 39. Ubicación del robot

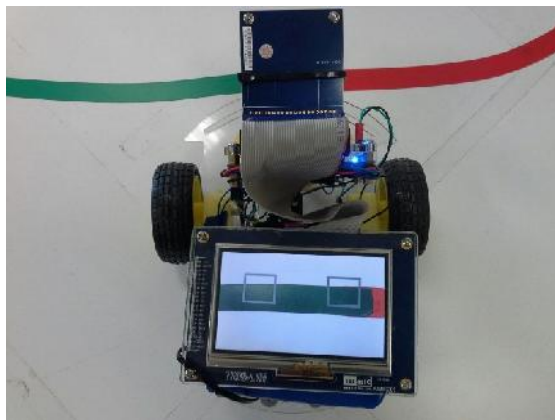


Figura 40. Ubicación del robot

En la figura 40, se aprecia la ubicación del robot observando de forma horizontal la línea verde, en esta ubicación los motores se detienen.

5.2 EVALUACION DE RESULTADOS

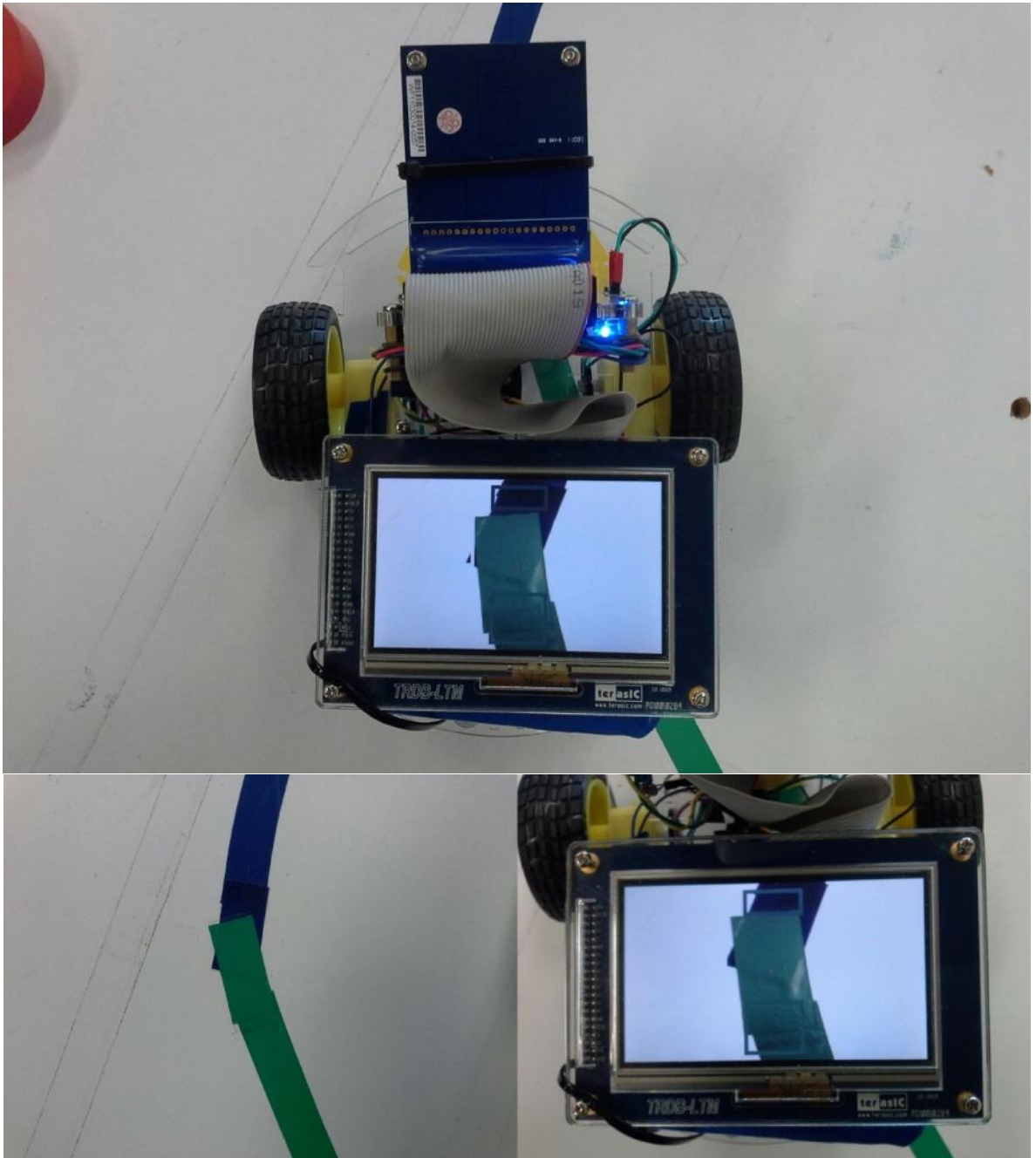


Figura 41. Calidad de la imagen

En la figura 41, se observa la calidad de la imagen de la cámara TRDB D5M junto con el sensor de luminancia, acoplado para contrarrestar problemas de iluminación

del ambiente o sombras del mismo robot, que generarían datos erróneos para la toma de decisiones del aparato robótico.

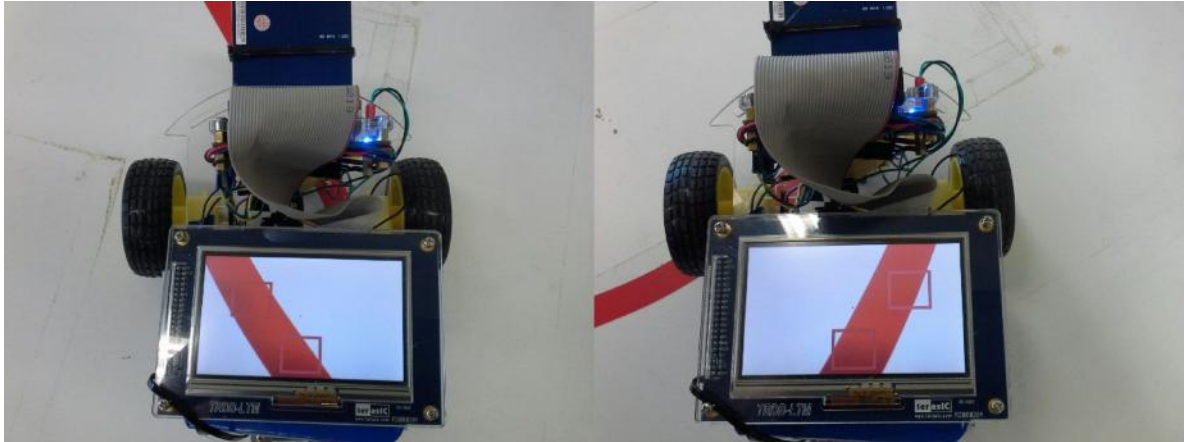


Figura 42. Calidad de la imagen

De igual manera la imagen tomada evita las imperfecciones de la pista, como manchones y superficies sucias, que podrían ocasionar problemas al correcto funcionamiento del robot.

Por medio de conceptos de procesamiento de imágenes se pueden elaborar algoritmos que permitan mejorar las estrategias de control y el correcto funcionamiento del robot. En la figura 43, se muestra la segmentación del color blanco permitiendo visualizar solamente la trayectoria por la que avanza el robot.



Figura 43. Segmentación del color blanco

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los sistemas de programación basados en procesamiento de imágenes buscan realizar operaciones de manera rápida, el sistema de lectura de imágenes con el desarrollo de hardware ejecutado por la FPGA demostró su alta capacidad para este tipo de sistemas robotizados, efectuando las tareas programadas en tiempo real.

Este proyecto justifica el desarrollo de sistemas basados en el procesamiento de imágenes con tarjetas de desarrollo FPGA, debido a su rendimiento y volumen de procesamiento.

El robot seguidor de línea guiado por los valores de píxeles de la imagen conectada a la tarjeta de desarrollo DE0-Nano cumple con los objetivos de detección de color y guía del robot, agregando una nueva forma de controlar un robot seguidor de línea de varios colores.

El aplicativo del robot es educativo y busca iniciar el desarrollo de sistemas robóticos con tarjetas de desarrollo de hardware.

PROYECCION

Este trabajo realizado muestra la capacidad del desarrollo de hardware con el procesamiento de imágenes, utilizando la técnica de enmascaramiento para detectar la trayectoria que debía seguir, para próximos trabajos se pueden implementar otros tipos de procesamiento de la imagen que detecten la trayectoria del robot y permitan una mayor velocidad de avance del mismo.

Es importante buscar alternativas para desarrollar robots con predicción de la trayectoria, haciendo un ajuste ubicando la cámara de manera inclinada y no de la manera que se ubica en este proyecto, se lograrían prototipos que cumplan este objetivo.

BIBLIOGRAFIA

TERASIC. THDB-D5M, Terasic D5M Hardware Specification. Document Version 0.1. Artículo. 2008-04-18. [Citado 2015-03-14]. Disponible en internet: <https://courses.cs.washington.edu/courses/cse467/08au/labs/Resources/THDB-D5M_Hardware%20specification.pdf>

TERASIC. TRDB_LTM, Inch Digital Touch Panel Development Kit. Document Version 1.22. Artículo. 2007-11-09. [Citado 2015-03-17]. Disponible en internet: <http://www.terasic.com.tw/attachment/archive/237/TRDB_LTM_UserGuide_v1.22.pdf>

TERASIC. TRDB-D5M. 5Mega Pixel Digital Camera Development Kit. User Manual 2003-2014. 2014-07-01. [Citado 2015-03-19]. Disponible en internet: <https://www.terasic.com.tw/attachment/archive/281/TRDB_D5M_UserGuide.pdf>

TERASIC. DE0-NANO. World Leading FPGA Based Products and Desing Services. User Manual 2003-2014. 2014-07-01. [Citado 2015-03-21]. Disponible en internet: <https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/ug/DE0_Nano_User_Manual_v1.9.pdf>

MONJE ARENAS, Luis. Introducción a la Fotografía Científica. El diafragma y el obturador. Cap. 5. Curso [en línea]. 2008. [Citado 2015-03-21]. Disponible en internet: <http://foto.difo.uah.es/curso/el_diafragma_y_el_obturador.html>

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Diccionario de la lengua española [Citado 2015-03-10]. Disponible en Internet: < <http://rae.es/recursos/diccionarios/drae>>

MILLONES DE PERSONAS, MILLONES DE PALABRAS. Diccionario on-line con la garantía Vox y Larousse [Citado 2015-03-10]. Disponible en Internet: < <http://www.diccionarios.com/> >