

**SISTEMA MÓVIL PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS ENFOCADO
A LA INSPECCIÓN AUTOMÁTICA DE DAÑOS EN SUPERFICIES
PAVIMENTADAS EMPLEANDO EL MÉTODO DE
TRIANGULACIÓN LÁSER**

**Por:
JAVIER MAURICIO PARRA RODRIGUEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2014**

Informe Final del Trabajo de Grado en la Modalidad Investigación

**SISTEMA MÓVIL PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS ENFOCADO
A LA INSPECCIÓN AUTOMÁTICA DE DAÑOS EN SUPERFICIES
PAVIMENTADAS EMPLEANDO EL MÉTODO DE
TRIANGULACIÓN LÁSER**

JAVIER MAURICIO PARRA RODRIGUEZ

**Trabajo de grado presentado como Requisito
Parcial para optar al Título de Ingeniero Electrónico**

Director:

MsE. JORGE HERNANDO RAMON SUAREZ

Codirector:

ING. YURI HERCILIA MELGAREJO

**Universidad Industrial De Santander
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2014

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1 GENERALIDADES DEL SISTEMA.....	10
2 PROCESO DE ESCANEEO EN SUPERFICIES PAVIMENTADAS	12
2.1 MÉTODO DE TRIANGULACIÓN LÁSER	13
2.1.1 GEOMETRÍAS EMPLEADAS EN TRIANGULACIÓN LÁSER	13
3 INSTRUMENTACIÓN PARA EL SISTEMA MÓVIL DE ESCANEEO LÁSER.....	17
3.1 CÁMARA MATRICIAL	17
4 INTEGRACIÓN TECNOLÓGICA	25
5 ESTRUCTURA ACOPLADA AL VEHICULO	27
6 RESULTADOS.....	29
CONCLUSIONES.....	37
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	38
BIBLIOGRAFIA.....	40

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Representación gráfica área del pavimento.</i>	11
<i>Figura 2 Sistema LCMS.</i>	13
<i>Figura 3. Esquemas de triangulación típicos (a) geometría 1, (b) geometría 2, (c) geometría 3, (d) geometría 4.</i>	14
<i>Figura 4. Geometrías método triangulación láser.</i>	15
<i>Figura 5. Cámara C4-2040-GigE.</i>	18
<i>Figura 6. Respuesta en frecuencia de la cámara C4-2040-GigE</i>	19
<i>Figura 7. Lente CF12.5HA-1 12.5mm.</i>	21
<i>Figura 8. Esquema de la proyección láser. (Perpendicular a la superficie).</i>	22
<i>Figura 9. Láser Magnum II 4000.</i>	23
<i>Figura 10. Representaciones filtro óptico (a) y (b).</i>	23
<i>Figura 11. Salida de pulsos en codificador rotatorio absoluto.</i>	24
<i>Figura 12. Salida codificador rotatorio incremental.</i>	24
<i>Figura 13. Codificador rotatorio relativo, referencia E50S82500-3-T-24.</i>	25
<i>Figura 14. Distribución eléctrica del alternador.</i>	26
<i>Figura 15. Fotografía del montaje final del sistema Sicaipav.</i>	27
<i>Figura 16. Distancias geometría 1.</i>	27
<i>Figura 17. Diseño prototipo acople a estructura.</i>	28
<i>Figura 18. Barra primaria.</i>	28
<i>Figura 19. Panel de configuración Cx_explorer.</i>	29
<i>Figura 20. Montaje laboratorio.</i>	30
<i>Figura 21. Patrón de calibración cubo.</i>	30
<i>Figura 22. Patrón de calibración piramidal.</i>	30
<i>Figura 23. Imágenes captadas con el software Cx_Explorer, para regiones de interés de (a) 2048x1088 píxeles y (b) 2048x200 píxeles, con tiempo de integración de 10000µs.</i>	31
<i>Figura 24. Parámetros selección de disparo o trigger.</i>	31
<i>Figura 25. Bornera C4-2040</i>	32
<i>Figura 26. Ajuste potencia láser, a)modulación 0V, b)modulación 5V.</i>	34
<i>Figura 27. Montaje sistema primera y segunda fase</i>	34
<i>Figura 28. Diagrama de conexión tercera fase.</i>	34
<i>Figura 29. Patrón de calibración piramidal.</i>	35
<i>Figura 30. Resultados de región de interés muy pequeña respecto de la escena.</i>	36
<i>Figura 31. Escenas, grieta pronunciada y estoperoles.</i>	36
<i>Figura 32. Escaneo de reductores de velocidad (estoperoles), (a) comienzo del escaneo, (b) punto medio del estoperol (altura máxima).</i>	36
<i>Figura 33. Secuencia de imágenes respectivas del escáner de la grieta pronunciada de la Figura 31.</i>	37

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Resumen de requerimientos.</i>	12
<i>Tabla 2. Comparativa entre las cámaras que Cumplen las especificaciones.</i>	18
<i>Tabla 3. Características principales cámara C4-2040-GigE.</i>	20
<i>Tabla 4. Comparación de cumplimiento de los requerimientos de los láseres [23], [24].</i> ..	22
<i>Tabla 5. Resumen características codificador rotatorio.</i>	25
<i>Tabla 6. Resumen del consumo de potencia del sistema.</i>	26
<i>Tabla 7. Parámetros de configuración cámara.</i>	32
<i>Tabla 8. Datos Pruebas de laboratorio 100.000us.</i>	33
<i>Tabla 9. Datos Pruebas de laboratorio 10.000us.</i>	33
<i>Tabla 10. Datos Pruebas de laboratorio 4us</i>	33

Resumen

TITULO: SISTEMA MÓVIL PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS ENFOCADO A LA INSPECCIÓN AUTOMÁTICA DE DAÑOS EN SUPERFICIES PAVIMENTADAS EMPLEANDO EL MÉTODO DE TRIANGULACIÓN LÁSER.^{1*}

AUTOR: Javier Mauricio Parra Rodríguez**

DIRECTOR: MsE. JORGE HERNANDO RAMON SUAREZ**

CODIRECTOR: ING. YURI HERCILIA MELGAREJO**

PALABRAS CLAVE:

Datos, reconstrucción 3D, superficies asfálticas, triangulación láser.

DESCRIPCION

En este trabajo de grado se propone un sistema de escaneo móvil basado en la técnica de triangulación láser, en superficies asfálticas. Primero se fijan los parámetros a alcanzar en la reconstrucción final del modelo 3D, como son: velocidad de desplazamiento, precisión para reconstrucción, condiciones ambientales, posibles efectos a la población, luego se estudia la técnica de triangulación determinando una geometría específica; esto partiendo del sistema SICAIPAV (sistema de inspección mediante imágenes bidimensionales, desarrollado por el grupo de investigación Geomatica de la Universidad Industrial de Santander) , posterior a esto se determinan los dispositivos que se requieren según parámetros de precisión, disponibilidad en el mercado, costo y soporte técnico para acompañamiento. En la etapa preliminar se encuentra el diseño de la estructura que soportara el sistema, desarrollado en software libre sketchup, luego viene el montaje de la estructura acoplada al vehículo, el cual se trata de una camionera Toyota 4x4 con platón utilizada en el sistema SICAIPAV. En el siguiente paso se desarrolla la integración tecnológica de los dispositivos adquiridos para la puesta en marcha del sistema, por último se procede a las pruebas de campo seleccionando escenas a escanear, las cuales se determinan por su tipo de deformación en la proyección laser, documentan y analizan los resultados.

*TRABAJO DE GRADO **ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA , AUTOR: JAVIER PARRA, DIRECTOR: MsE. JORGE RAMON, CODIRECTOR: YURI MEJIA.

Abstract

TITLE: SISTEMA MÓVIL PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS ENFOCADO A LA INSPECCIÓN AUTOMÁTICA DE DAÑOS EN SUPERFICIES PAVIMENTADAS EMPLEANDO EL MÉTODO DE TRIANGULACIÓN LÁSER.^{2*}

AUTHORS: JAVIER MAURICIO PARRA RODRIGUEZ**

DIRECTOR: *MsE. JORGE HERNANDO RAMON SUAREZ***

CODIRECTOR: ING. YURI HERCILIA MELGAREJO**

KEY WORDS: Data, 3D reconstruction, asphalt surfaces, laser triangulation.

In this paper grade mobile scanning system based on laser triangulation technique, is proposed in asphalt surfaces. First the parameters to achieve the final reconstruction of the 3D model are fixed, such as: speed, precision recreation, environmental conditions, potential impacts to the population, then the triangulation technique is studied by determining a specific geometry; this starting from SICAIPAV system (inspection by two-dimensional images, developed by the research group Geomatica Industrial University of Santander), after this the devices required as precision parameters, market availability, cost is determined and Support for accompaniment. In the preliminary stage is the design of the structure that supported the system, developed in free software sketchup, then comes the mounting structure attached to the vehicle. Which is a Toyota 4x4 trucking with Plato used in the system SICAIPAV . In the next step of integrating technology devices purchased for the implementation of the system is developed, finally proceed to field testing scanning selecting scenes, which are determined by the type of deformation on the laser projection, document and analyze the results.

*TRABAJO DE GRADO **ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA , AUTOR: JAVIER PARRA, DIRECTOR: MsE. JORGE RAMON, CODIRECTOR: YURI MEJIA.

INTRODUCCIÓN

A través de los años el reconocimiento automático de daños en las vías se ha convertido en un área muy importante. Con la integración de diferentes tecnologías es posible identificar los daños antes de que sean más profundos y así poder reducir las pérdidas económicas, permitiendo dar una solución más eficiente en el momento de seleccionar los tiempos, métodos y lugares más apropiados para la reparación del pavimento.

Los daños en las vías tienen un nivel de gravedad y peligro asociado [1], para determinar estos calificativos se han desarrollado sistemas de gestión de pavimentos (PMS, de sus siglas en inglés) [2], destacando de ellos una sección clave como es la inspección de la condición del pavimento, llevando a cabo una adquisición de datos más objetiva y precisa [3].

Desde los años 80 la información ha sido recolectada a través de inspección visual, pero esta técnica es personal, inconsciente, tediosa y frecuentemente peligrosa. Debido a esto se han desarrollado métodos con el fin de adquirir y posteriormente analizar los datos sobre la condición de la superficie del pavimento [4].

El esquema general del análisis automático y semiautomático de daños superficiales en el pavimento divide los procesos en dos partes principales, en la primera se lleva a cabo la adquisición de los datos geo-referenciados y en la segunda parte los datos son almacenados, ya sea para el procesamiento dentro del vehículo o fuera de línea.

Existen dos tecnologías de adquisición de datos: la primera mediante imágenes de la superficie a través de fotografías, videos o digitalización, y la segunda es la medición del perfil longitudinal y transversal del pavimento con la utilización de sensores sin contacto. La última tendencia para la adquisición de imágenes ha sido la obtención de datos tridimensionales, eso con el fin de disminuir la afectación de las imágenes por sombras y así poder tener mayor información en una sola adquisición de datos.

En este trabajo se implementa un sistema de triangulación como método de captación de datos en superficies pavimentadas. Para este sistema la importancia se centra en la integración tecnológica de los dispositivos de captación, sincronización, y en la adaptación a la estructura existente del SICAIPAV[5] que es un sistema de captación de imágenes bidimensionales por medio de una cámara lineal empleado en la inspección de vías pavimentadas desarrollado por el grupo Geomática de las Universidad Industrial de Santander

1 GENERALIDADES DEL SISTEMA

A medida que la eficiencia en las labores de inspección de la condición de los pavimentos se hace más demandante, las agencias y entes reguladores tienen como propósito disminuir los tiempos y costos en los que se ejecutan tales

labores, agilizando la intervención en las vías que lo requieran mitigando los impactos en el proceso de los PMS.

Aunque se ha hecho análisis a partir de imágenes bidimensionales, las imágenes pierden gran cantidad de información con respecto a la profundidad en daños superficiales, siendo esta profundidad una característica importante para determinar la condición del pavimento, para esto sería necesaria una reconstrucción en tres dimensiones.

Uno de los métodos de reconstrucción tridimensional más conveniente en esta aplicación es la perfilometría, también conocida como la reconstrucción de luz estructurada, que consiste en proyectar un patrón de luz láser conocido, sobre la superficie pavimentada, el haz láser presentará deformaciones por efecto del daño. Esta deformación es captada por una cámara y luego de análisis y procesamiento de imágenes junto con las ecuaciones respecto de la geometría del sistema de proyección, se procede a reconstruir la imagen tridimensional [3].

El objeto a escanear en esta aplicación es la superficie del pavimento, la medida del área se representa en la Figura 1, donde x representa el ancho de la vía; y es el largo y z la profundidad que puede ser entre menos de un milímetro y algunos centímetros.

El ancho de calzada sencilla en una vía es en promedio de 7.30m [6], lo que en un sentido representa 3.65m. Esta longitud es posible cubrirla con dos cámaras, por tanto se realiza la selección de los dispositivos con objetivo de cubrir 2m y dejar como trabajo futuro la réplica del sistema para cubrir la totalidad de la calzada.

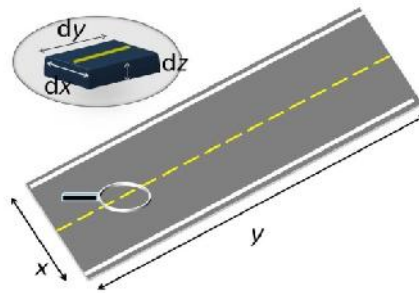
La estructura que soporta el sistema debe acoplarse al vehículo, el diseño se realiza dependiendo de las características de los dispositivos seleccionados, sin sobrepasar los 2.80m de altura debido al código nacional de tránsito [7].

Los requerimientos de resolución para reconstrucción tridimensional dx , dy y dz deben tener una precisión de 1mm o menor, requisito exigido por el grupo Geomática.

Otro requerimiento importante de la aplicación es sincronizar la adquisición de imágenes de la cámara con la velocidad de desplazamiento del vehículo.

Según un estudio realizado por el fondo de prevención vial los límites de velocidad en diferentes áreas de Bucaramanga son de 40km/h máximo en zona urbana. [8].

Figura 1 Representación gráfica área del pavimento.



Por otro lado, la fuente de suministro de energía del sistema debe estar dentro del vehículo ya sea una fuente externa o la generación propia de este, este aspecto se concluirá al final de la selección de los componentes conociendo el consumo total necesario para operar.

La Tabla 1 muestra un resumen de los requerimientos establecidos para la construcción del sistema.

Precisión de reconstrucción	de	1mm en las tres dimensiones
Longitud de escaneo (x)		2m
Velocidad de adquisición		< 40km/h

Tabla 1. Resumen de requerimientos.

2 PROCESO DE ESCANEO EN SUPERFICIES PAVIMENTADAS

Los defectos de la superficie de un pavimento tienen características tridimensionales en diferentes tamaños pero todas con coordenadas en x , y , y z , esto hace que los avances en el sistema de adquisición de datos tridimensionales para la inspección de pavimentos generen nuevas expectativas entre los profesionales que trabajan en esta área, esperando mejores resultados y tener acceso a una mejor solución para el análisis automático de los daños superficiales[4].

Existen diferentes vehículos de inspección que incluyen dentro de sus características el escaneo tridimensional, algunos sensores pueden llegar a valores realmente considerables, tal es el caso del sistema LCMS (de su sigla en inglés Laser Crack Measurement System) en el que cada perfilómetro oscila en un precio entre \$250,000US y \$300,000US dependiendo de las características.

Estos dispositivos son capaces de medir los perfiles transversales de una carretera con una resolución de 1 mm capturando los datos a velocidades de autopista. Este sistema recopila información de intensidad (imágenes) así como información geométrica (tridimensional) de la superficie del pavimento, lo que permite caracterizar y mostrar imágenes de alta calidad junto con la forma (textura) del pavimento. En la Figura 2 se muestran los sensores y el modo de adquisición de datos que plantea este sistema.

Figura 2 Sistema LCMS



Sistema LCMS, [9].

2.1 MÉTODO DE TRIANGULACIÓN LÁSER

El principio de reconstrucción por triangulación láser se puede definir como la toma de información de una superficie llevada a un modelo digital con una geometría específica, dentro de un sistema de coordenadas. Esta técnica se soporta en el conocimiento de las posiciones relativas entre el sensor y el emisor, específicamente se basa en la proyección de un patrón de luz sobre una superficie.

El emisor puede producir luz coherente (e.g un haz láser) o luz incoherente; en los dos casos, se proyecta un patrón de luz definido (puntos, líneas u otros más complejos) sobre la superficie del objeto. Para producir el patrón de luz estructurada se han adoptado diferentes tecnologías: emisores láser, proyectores de luz blanca y proyectores de video.

La solución más simple ha sido generar en cada instante de tiempo un plano lineal, que es el mecanismo básico de la mayoría de dispositivos basados en láser, este método proyecta un único perfil en la superficie a escanear. Otras soluciones, que tienden a acelerar el proceso, proyectan múltiples franjas o planos de luz. Sin embargo, la reconstrucción de un patrón de múltiples características es ligeramente más compleja que el de una línea.

2.1.1 GEOMETRÍAS EMPLEADAS EN TRIANGULACIÓN LÁSER

La geometría del sistema es determinante en el momento de captación de los datos y con gran consecuencia en el momento de reconstrucción de las imágenes, en la Figura 3 se muestran las geometrías típicas en el método de triangulación láser.

La Figura 3 (a) muestra la geometría 1 en la que se proyecta un patrón láser perpendicular a la superficie del objeto y la cámara se encuentra a un ángulo de triangulación con respecto de la normal del objeto, en esta configuración la altura z se puede hallar con la ecuación (1):

$$\Delta_z \approx \frac{L \cos(\theta)}{\sin(\theta)} \quad (1)$$

En la Figura 3 (b) la cámara se posiciona perpendicular a la superficie del objeto mientras se proyecta el patrón láser a un ángulo respecto de la normal del objeto, en esta configuración la altura z se puede hallar con la ecuación (2):

$$\Delta_z \approx \frac{L \sin(\theta)}{\tan(\theta)} \quad (2)$$

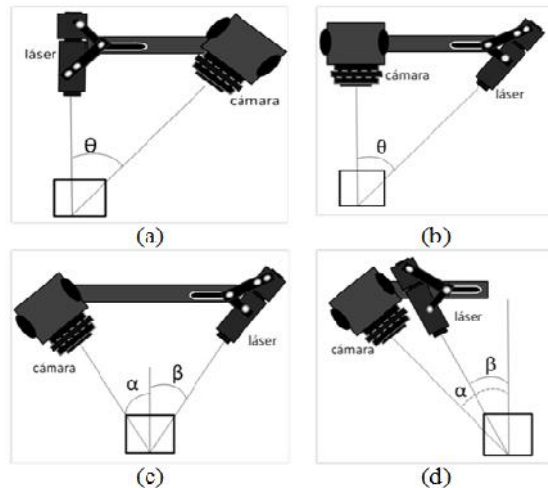
En la Figura 3 (c) la cámara se posiciona a un ángulo respecto de la normal del objeto en sentido anti horario mientras se proyecta el patrón láser a un ángulo respecto de la normal del objeto en sentido horario, en esta configuración la altura z se puede hallar con la ecuación (3):

$$\Delta_z \approx \frac{L \cos(\frac{\alpha + \beta}{2})}{\sin(\frac{\alpha - \beta}{2})} \quad (3)$$

Si los ángulos de inclinación de la cámara y el proyector láser con respecto de la normal del objeto son iguales $\alpha = \beta$ la ecuación para calcular z es (4):

$$\Delta_z \approx \frac{L \cos(\alpha)}{2 \sin(\alpha)} \quad (4)$$

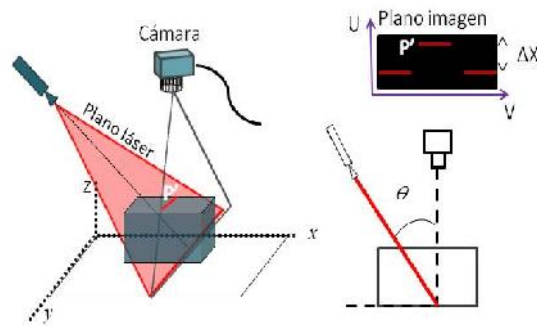
Figura 3. Esquemas de triangulación típicos (a) geometría 1, (b) geometría 2, (c) geometría 3, (d) geometría 4.



Por facilidad de acople mecánico las geometrías a utilizar pueden ser 1 o 2 para que alguno de los dispositivos tenga un ángulo de ataque perpendicular a la superficie, el ángulo del otro dispositivo se define en 45° debido a que representa una relación de 1:1 y es el más utilizado en la técnica de escaneo.

En la superficie del bloque de la Figura 4 con altura z , se proyecta el plano láser y en cuya intersección se presenta la discontinuidad de la línea láser representada en la cámara digital por un corrimiento x .

Figura 4. Geometrías método triangulación láser.



Perpendicular al bloque se encuentra el plano de focalización de la cámara también llamado plano de referencia o plano imagen, en donde x es una codificación de la altura z , que es determinada por tratamiento digital teniendo en cuenta el ángulo de proyección (θ) del láser con respecto de la cámara [10], [3], [11]. Para obtener información tridimensional de todo el bloque, es necesario desplazar el plano láser por el eje x para captar su representación en el plano imagen, de tal forma que si se realizan n barridos a intervalos de desplazamientos Δx , entonces, la respectiva coordenada x de todos los puntos sobre la n -ésima línea será:

$$x_i = n \Delta x \quad (5)$$

En general se proyecta un plano láser sobre la superficie a escanear con ángulo con respecto del eje z , que para esta geometría coincide con el sistema de observación, el haz se intercepta sobre el objeto en el punto representándose en P' en la imagen.

Basados en la ley de Gauss para las lentes delgadas [12], se define que la coordenada z del punto P sobre la línea de intersección se relaciona con la coordenada U en la imagen P' según la ecuación (6).

$$z(U) = \frac{U}{M \left(\tan(\theta) + \frac{U}{f} \right)} \quad (6)$$

Para relacionar la coordenada Y del punto P en el mundo real se recurre a la siguiente ecuación (7):

$$Y(U, V) = \frac{\left(\frac{l_0}{f}\right) V - UV \cos(\theta)}{M \left(\tan(\theta) + \frac{U}{f} \right)} \quad (7)$$

Donde $M \cong f/d_o$, siendo f la focal efectiva del objetivo de la cámara, distancia desde O hasta el centro del sistema óptico del objetivo. Por tanto, conociendo los parámetros del sistema óptico y obteniendo las coordenadas (U,V) sobre la imagen de la línea láser, se pueden calcular las coordenadas (x, y, z).

Es de aclarar que como el valor de las coordenadas (U,V), es obtenido de la imagen 2D capturada por el sistema de observación, sus unidades están en píxeles, por lo que para conocer las unidades de las coordenadas del mundo real en mm, es necesario realizar la conversión de mm a píxeles. Para esto, es necesario conocer el número y el tamaño del arreglo de sensores de la cámara.

Si la cámara tiene $m \times n$ píxeles y todo el arreglo es de tamaño $M \times N$ (en mm), el factor de conversión en la dirección de U (K_x) y en la dirección de V (K_y) será respectivamente,

$$k_x = \frac{M}{N} \quad (8)$$

$$k_y = \frac{N}{m} \quad (9)$$

De esta manera las ecuaciones quedan así:

$$z(U) = \frac{k_x U}{M \left(\tan(\theta) + \frac{k_x U}{f} \right)} \quad (10)$$

Donde las unidades de U son píxeles y las de Z milímetros.

$$F(Z) = \frac{y}{V} = \frac{l_0}{k_y f} - \frac{k_y \cos(\theta)}{f} \cdot Z \quad (11)$$

La relación Y/V tiene unidades de milímetro por pixel (mm/pixel).

3 INSTRUMENTACIÓN PARA EL SISTEMA MÓVIL DE ESCANEEO LÁSER

Generalmente, el método de triangulación láser se implementa por medio de cámaras matriciales y una proyección de línea láser. En este trabajo, luego de establecer los requerimientos y el modelo de triangulación se determina que el sistema de escaneo debe estar compuesto por: una cámara y un lente que permitan captar una escena de hasta 2m de ancho, un láser con un grosor en la proyección de línea hasta de 1mm y un codificador rotatorio integrado con la cámara para sincronizar la captación de imágenes con la velocidad del vehículo. En las siguientes subsecciones se detallan los procedimientos de selección de estos dispositivos.

3.1 CÁMARA MATRICIAL

En el proceso de selección de la cámara se tuvieron en cuenta tres parámetros. Primero, la resolución, que indica la calidad visual que puede observarse en una imagen digital; segundo, la velocidad de adquisición, que interviene significativamente en la cantidad de información captada en el cambio de escena y por consiguiente en la precisión de 1mm en la reconstrucción; y tercero, la posibilidad de obturación con una señal externa.

La resolución es el mínimo valor que se puede representar de una escena real en una imagen digital [13] y está directamente relacionada con la exactitud en la reconstrucción del daño superficial. Por ejemplo, para una longitud de escaneo de 4m, una cámara de 1300 píxeles en dirección transversal al pavimento podrá detectar daños de hasta 3mm de ancho; como se demuestra en la ecuación (12), mientras que una de 4000 píxeles de hasta 1mm.

$$A = \frac{L}{R} = \frac{4000 \text{ píxeles} \cdot 10 \text{ mm}}{1300 \text{ píxeles}} = 3.07 \text{ mm/p} \quad (12)$$

Como la precisión que se requiere es de 1mm la cámara debe tener esta cobertura por píxel, esto relacionado con la longitud de calzada a cubrir que es de 2m, la resolución debe ser de mínimo 2000 píxeles.

Para esta aplicación y teniendo en cuenta el método de triangulación se requiere cubrir un área en la que aparezca el haz láser deformado, en este caso se seleccionó una longitud de 1m en dirección de la vía, de lo que resulta una región de interés de 2000x1000 píxeles o 2Mp, pero como en imágenes digitales no se hace referencia de 1000 sino de 1024 esto resulta ser 2048x1024, por tanto se requiere una cámara de alta resolución que cumpla estas características, en donde alta resolución se define a partir de 872x480 píxeles [14], [15].

Por otro lado, teniendo el requisito de velocidad de escaneo de 40 km/h y el diámetro d de las ruedas del vehículo se procede de la siguiente manera:

Siendo $d=75\text{cm}$, lo que para una revolución es en recorrido una longitud de $P=2356.2\text{mm}$, entonces para recorrer 40km son necesarias $16,976\text{krev}$ (esto en una hora), de lo que resulta $W=4.71\text{rev/seg}$ por tanto para conservar la resolución de 1mm/píxel , se necesita una tasa de adquisición de por lo menos 11.097kHz concluyéndolo de la ecuación (14), siendo un requisito importante en la cámara a seleccionar y fijándose también el punto de partida para la selección del codificador rotatorio.

$$sp = W + P = \frac{4.71)(2356.2)}{1000} = 11097 \text{ mm/seg} \quad (14)$$

Donde P es el perímetro de la rueda, W es la velocidad angular y sp es la velocidad de perfil.

La Tabla 2 muestra una comparación de dos cámaras con características similares, considerando calidad, disponibilidad en el mercado y que cumplan con los requerimientos concluidos.

	MV-d2048x1088-3d03-760-g2-8	C4-2040-GigE camera
Resolución	2048x1088	2048x1088
Tamaño pixel	5.5um x5.5um	5.5umx5.5um
Tamaño sensor	11.26mmx5.984mm	11.264mmx5.984mm
Algoritmos 3D	modo combinado 3d y exploración por líneas	max trsh,cog, perfiles de controlador d e imagen
Entrada codificador rotatorio	A/B RS-422 shaft encoder interface	digital trigger input 2 optoisolated inputs, encoder trigger input rs422
Rata de adquisición	340fps	340fps

Tabla 2. Comparativa entre las cámaras que Cumplen las especificaciones.

La cámara que se seleccionó para esta aplicación es la cámara 3D C4-2040-GigE y se muestra en la Figura 5, con una resolución de 2048×1088 y velocidad de adquisición de perfiles hasta de 25kHz . Tiene gran integración con otros equipos, puede controlar la frecuencia de disparo de un láser y sus obturaciones se pueden sincronizar con entradas digitales de onda cuadrada, por ejemplo un tren de impulsos de máximo 25V de amplitud. Además de generar una imagen monocromática tradicional, la cámara tiene integrada una FPGA que permite detectar una línea láser en la escena.

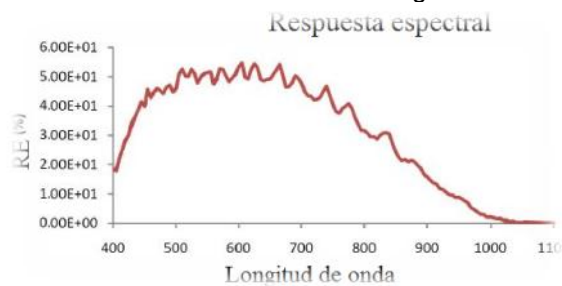
Figura 5. Cámara C4-2040-GigE.



Cámara C4-2040-GigE [18].

El sensor que posee esta cámara, como se observa en la Figura 6 tiene una respuesta en gran parte del espectro visible y no visible lo cual da un margen amplio en la selección de la longitud de onda del proyector láser.

Figura 6. Respuesta en frecuencia de la cámara C4-2040-GigE



Cámara C4-2040-GigE [18].

El protocolo de comunicación que emplea esta cámara es el Gigabit Ethernet, que es una ampliación estándar de Ethernet 802.3 del IEEE, que consigue una capacidad de transmisión de 1 Gigabit por segundo de rendimiento [16] siendo suficiente en esta aplicación, este protocolo se transmite mediante el estándar RS-422 que define niveles de voltaje y especificaciones eléctricas de transmisor/receptor [17]. La Tabla 3 resume las características principales de la cámara.

	C4-2040-GigE
Modos de sincronización	<i>Free running, Triggered, Software Triggered</i>
Entrada digital de trigger	5V o 24V
Entrada de codificador rotatorio como trigger	RS422 con terminación de 100 Ohm
Con control de iluminación (láser)	5V DC, 200 mA, modulación de 20 kHz
Algoritmos 3D	MAX, TRSH, COG
Conector <i>Ethernet</i>	RJ45
Voltaje de entrada	10-24 VDC

Consumo de potencia	<10W
Interfaz de salida de datos	Gigabit Ethernet (IEEE 802.3)
Resolución del sensor	2048x1088
Tamaño del pixel	5,5µmx5,5µm
Tamaño del sensor	11.264mm x 5.984mm, diagonal: 14.638mm
Resolución ADC	10 bits

Tabla 3. Características principales cámara C4-2040-GigE.

3.2 LENTE

El lente influye directamente sobre cómo se verá la imagen, su selección se determina por el parámetro de la distancia focal. La distancia focal es la distancia existente desde el centro óptico del lente al sensor de la cámara, esta permite acercar o alejar visualmente el objeto y ampliar o reducir el ángulo del campo visual, así a mayor distancia focal más cercano se ve el objeto y por consiguiente menor campo visual [19].

Las cámaras normales poseen lentes fijos mientras que las de tipo especial o profesional tienen un acople mecánico para diferentes lentes. Como la cámara C4-2040-GigE es de alta resolución, es necesario integrarla con un lente que permita cubrir un ancho adecuado.

Teniendo en cuenta el tamaño del sensor de la cámara, el límite de altura de la estructura y siguiendo la guía para selección de lentes [19], [20], se puede encontrar el lente que se requiere con la siguiente expresión:

$$f = \frac{D}{\frac{\omega}{\omega_a}} \quad (15)$$

Dónde ω es el ancho del sensor, ω_a es el ancho del objeto, f es la longitud focal y D es la distancia lente- objeto como se demuestra en la ecuación (16).

$$f = \frac{D}{\frac{\omega}{\omega_a}} = \frac{(11.264\text{mm})(220\text{mm})}{2000\text{m}} = 12.5\text{mm} \quad (16).$$

Para el acoplamiento del lente a la cámara, existen dos montajes estándar: montaje C y montaje CS, ambos a rosca, la cámara C4-2040-GigE tiene montaje tipo C. El montaje C utiliza rosca 1-32-UN-2A y posee distancia focal a 17,5mm del zócalo del lente. El montaje CS utiliza rosca 1-32-UN-2A y posee el punto focal a 12,5 mm del zócalo del lente. Existen anillos adaptadores para pasar del montaje C al CS lo que

es conveniente en esta aplicación, por tanto la selección más cercana es la de una lente de 12,5mm. Al seleccionar un lente de 12.5mm la distancia en donde debe ubicarse la cámara respecto del objeto es de $D=222\text{cm}$. La lente seleccionada que cumple de manera cercana la característica de la focal es el lente CF12.5HA[21] (ver figura 7).

Figura 7. Lente CF12.5HA-1 12.5mm.



Lente CF12.5HA-1 12.5mm. [21]

3.3 SELECCIÓN DEL PROYECTOR DE LÍNEA LÁSER

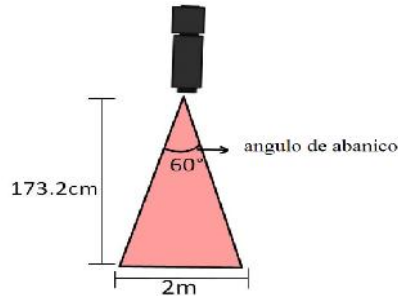
Para la selección del láser se tuvo en cuenta que el sistema estará sometido a un entorno de iluminación externa, que la línea proyectada debe cubrir al menos 2m y que el ancho de la línea debe ser de máximo 1mm para cumplir con la precisión de reconstrucción establecida.

En un ambiente exterior la potencia de la luz láser debe superar a las posibles fuentes externas naturales o artificiales.

La luz del sol es la principal fuente en este entorno, ésta tiene una densidad de potencia de $1,37 \text{ kW/m}^2 = 1,37\text{mW/mm}^2$ [22], siendo esta potencia el punto de partida: Si el haz láser debe abarcar una distancia de 2m de longitud en dirección transversal y un ancho de aproximadamente 1mm, el área de la línea es $(2000)(1) = 2000\text{mm}^2$ por lo tanto la potencia del láser debe ser superior a $(1,37)(2000) = 2740\text{mW}=2,74\text{W}$.

Otro aspecto importante es su configuración geométrica dentro del sistema, por tanto, si su ángulo de ataque definido es de 45° se requiere un ángulo de abanico (fan angle) del láser entre 55° y 75° completando así sus especificaciones para una proyección de 2m. En la Figura 8 se ilustra el esquema de proyección láser.

Figura 8. Esquema de la proyección láser. (Perpendicular a la superficie).



Dos láseres que cumplen la mayoría de los requerimientos son el Magnum II 4000 y el LRD-0808-PFR-02000-05. En la Tabla 4 se hace una comparación del cumplimiento de los requerimientos de los dos láseres.

Proveedor	MEXITEK, S.A.	LASERGLOW TECHNOLOGIES
Características	Espesor de línea 1mm máximo	Espesor de línea 5 mm máximo
	Longitud de onda 810 nm	Longitud de onda 810 nm
	Potencia 3200mW	Potencia >2000mW

Tabla 4. Comparación de cumplimiento de los requerimientos de los láseres [23], [24].

A pesar de que las características de los dos láseres son similares una diferencia importante es que el láser LRD-0808-PFR-02000-05 que ofrece la empresa Laser Glow genera una línea con una resolución de entre 5 y 8 mm, que no es conveniente para la aplicación, a diferencia del láser Magnum II 4000 que varía su ancho de láser de manera lineal con la altura, obteniéndose un ancho de 0.7 mm a una distancia de aproximadamente 2 m. Por lo tanto, se selecciona el Magnum II 4000 de la Figura 9 con potencia de salida del haz de 3200mW y longitud de onda de 810 nm.

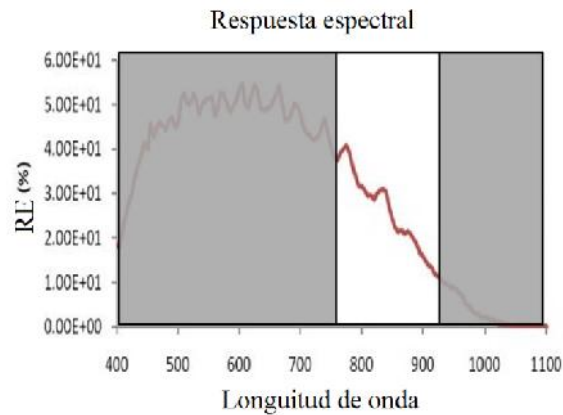
Figura 9. Láser Magnum II 4000.



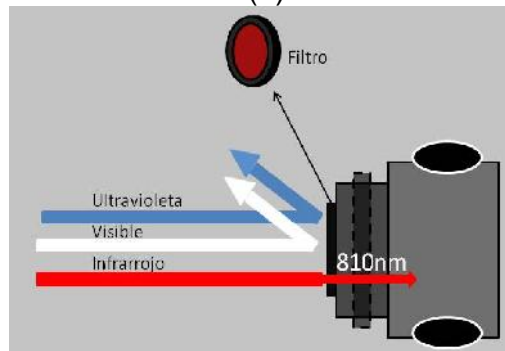
Láser Magnum II 4000. [24].

La característica de longitud de onda (810nm) de este láser junto con la respuesta en frecuencia de la cámara, da lugar para seleccionar un filtro óptico que permita a la cámara captar solo este rango de espectro, como se simboliza en la Figura 10 (a) y (b), de manera que en la imagen se vea únicamente la línea láser deformada.

Figura 10. Representaciones filtro óptico (a) y (b).



(a)



(b)

3.4 CODIFICADOR ROTATORIO RELATIVO

Al ser este proyecto un sistema móvil se requiere la sincronización entre el movimiento de la escena y el disparo de la cámara, para tal propósito se emplea un codificador rotatorio que es acoplado a una de las ruedas del vehículo y se integra al sistema.

El codificador rotatorio también llamado codificador de eje o generador de pulsos, es un dispositivo electromecánico utilizado en la conversión de la posición angular de un eje a un pulso digital, y se clasifican en relativo o absoluto [25]; el primero como se ve en la Figura 11 entrega una cantidad de pulsos digitales por cada revolución; el segundo memoriza una posición dada y partir de esta entrega la información de los pulsos por revolución, las revoluciones que ha girado y su sentido de giro, como se simboliza en la Figura 12. Se seleccionó un codificador rotatorio relativo, porque solo se requiere una señal de pulsos que active la obturación de la cámara.

Figura 11. Salida de pulsos en codificador rotatorio absoluto.

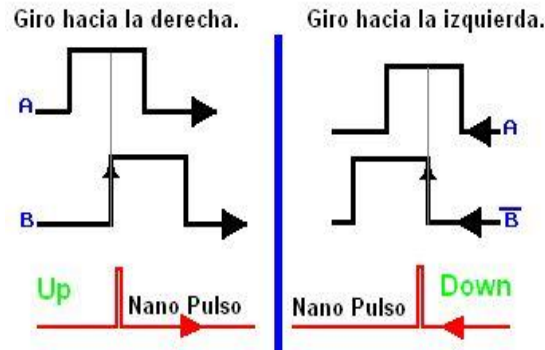
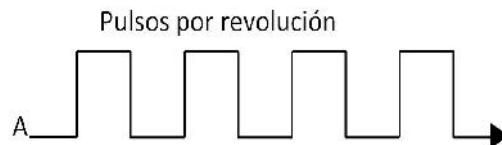


Figura 12. Salida codificador rotatorio incremental.



Para determinar la cantidad de pulsos por revolución del codificador rotatorio, se debe conocer el diámetro de la llanta del vehículo que es de 75cm, es decir, recorre 235,62cm en una vuelta o revolución; lo que significa que para tener una resolución de 1mm/píxel, el codificador debe generar 2356 PPR.

Con base en los requerimientos, se revisaron las especificaciones que ofrecen estos dispositivos en el mercado, que se muestran en la Tabla 5.

Pulsos por revolución	Salida de fase	Tipo de salida	Alimentación (VDC)
>2356	A, B	Totem pole	5
	A, B, Z	NPN open collector	12-24
	A, A', B, B'	Voltage output	
	A, A', B, B', Z, Z'	L: Line driver output	

Tabla 5. Resumen características codificador rotatorio.

Finalmente, se seleccionó un codificador rotatorio de 2500PPR, con una salida de fase tipo 3 (estándar), alimentación de entre 12V y 24V y salida tipo Totem pole, caracterizada por baja disipación de potencia. Sus dimensiones son 5 cm de diámetro, con un eje de 8 mm de diámetro que facilita el acople con la llanta. En la Figura 13 se muestra el codificador seleccionado.

Figura 13. Codificador rotatorio relativo, referencia E50S82500-3-T-24.



Codificador rotatorio relativo, E50S82500-3-T-24. [25].

4 INTEGRACIÓN TECNOLÓGICA

La integración tecnológica es el conjunto de capacidades de los dispositivos que se agregan a un sistema con una función específica, en este caso es el sistema móvil de escaneo tridimensional mediante la técnica de triangulación láser; ya seleccionando los dispositivos, el siguiente paso es su interconexión, pero primero se debe cumplir el requisito de suministro de energía.

La Tabla 6 expone la demanda de potencia del sistema de triangulación láser, que es de aproximadamente 80 W (7 A a 12 V DC), este consumo se presenta solo en

el momento de puesta en marcha del vehículo, por tanto se simplifica la búsqueda de fuentes de energía para alimentar el sistema, pues es factible el uso directo del sistema eléctrico del vehículo.

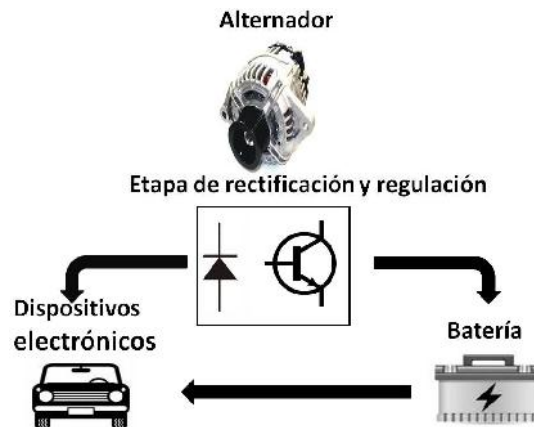
Consumo de potencia	Watts
Cámara	10
Láser	60
Codificador rotatorio	0,72
Cámara lineal (extra)	8,5
Total	79,22

Tabla 6. Resumen del consumo de potencia del sistema.

El sistema eléctrico en un vehículo podría dividirse en tres etapas: antes, durante y después del encendido. Cuando el vehículo está apagado, la batería es la fuente de potencia. En el momento del encendido, la batería debe tener la carga suficiente para activar el motor de arranque, luego del encendido la batería ha entregado una gran cantidad de potencia en un período corto y necesita ser cargada. Esta recarga es posible gracias al alternador que posee el vehículo [26].

Los alternadores son a grosso modo, un conductor sometido a un campo magnético variable, que crea una tensión eléctrica inducida cuya polaridad depende del sentido del campo y del valor del flujo que lo atraviesa. Esta fuente de energía además de recargar la batería sirve para proporcionar corriente eléctrica a las distintas cargas del vehículo como son el sistema de alimentación de combustible, las luces, los limpia parabrisas, radio etc. En la Figura 14 se observa la distribución eléctrica del alternador [27].

Figura 14. Distribución eléctrica del alternador.



En cuanto al consumo energético en un vehículo liviano, se pueden referir a manera de ejemplo los faros antiniebla. Estos faros consumen alrededor de 75W entre los dos, lo que se acerca bastante al consumo energético total del sistema de triangulación, por tanto se concluye que con el vehículo encendido se puede proveer la energía necesaria.

5 ESTRUCTURA ACOPLADA AL VEHICULO

Para la estructura que soporta el sistema en la camioneta, se parte del sistema de captación de imágenes de vías pavimentadas, SICAIPAV [5] el cual se muestra en la figura 15, consta de las siguientes características principales:

Figura 15. Fotografía del montaje final del sistema Sicaipav.

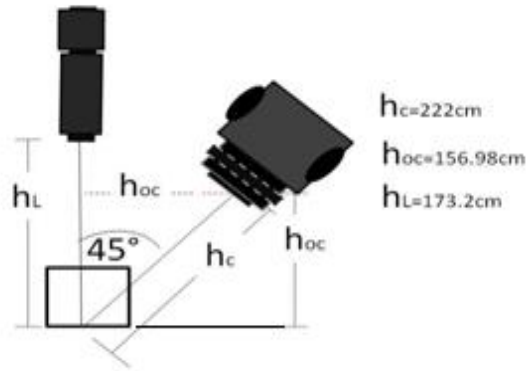


- Sistema de amortiguado para la estructura.
 - Facilitar el montaje y el desmontaje en la camioneta.
- Y se anexarán los siguientes requerimientos:
- Proteger los dispositivos de la lluvia y los impactos.
 - Permitir modificar la altura y ángulo de ataque de la cámara.
 - Permitir modificar la altura del láser.
 - Conservar características de utilidad del sistema *SICAIPAV*.

Por tanto, según las posibles geometrías a seleccionar, la más adecuada es la geometría 1, (ver figura 3 a), permitiendo la ubicación del láser de manera perpendicular a la superficie para disminuir la reflexión del haz láser, pues debido a las recomendaciones de uso del dispositivo puede generar daños en la retina de las personas, además esta geometría también permite un aporte bajo de vibraciones a la estructura. En lo referente a la cámara se ubica en un ángulo de ataque de 45° .

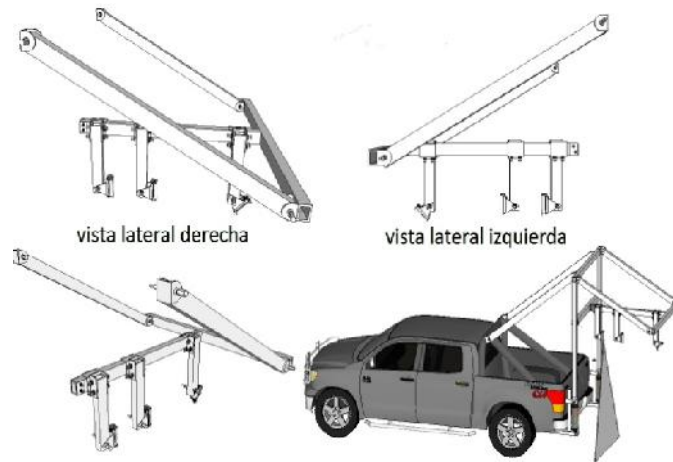
Las distancias para la adaptación a la estructura se presentan en la Figura 16.

Figura 16. Distancias geometría 1.



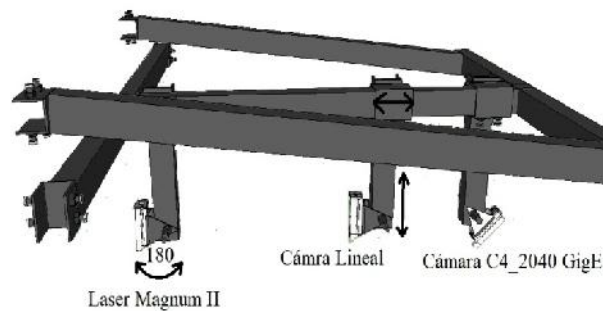
El diseño propuesto de la Figura 17 es un acople estructural acorde al Sicaipav, respetando su funcionalidad original.

Figura 17. Diseño prototipo acople a estructura.



El principal aporte del acople diseñado está en su barra primaria que es donde se sitúan los dispositivos, tanto en sentido vertical, horizontal y de rotación de 180° como se representa en la Figura 18.

Figura 18. Barra primaria.



RESULTADOS

Se realizaron dos tipos de pruebas: la primera en laboratorio, donde se ajustaron los parámetros de cada uno de los dispositivos y se integraron por primera vez, otra prueba en campo con integración total, donde intervinieron factores ambientales.

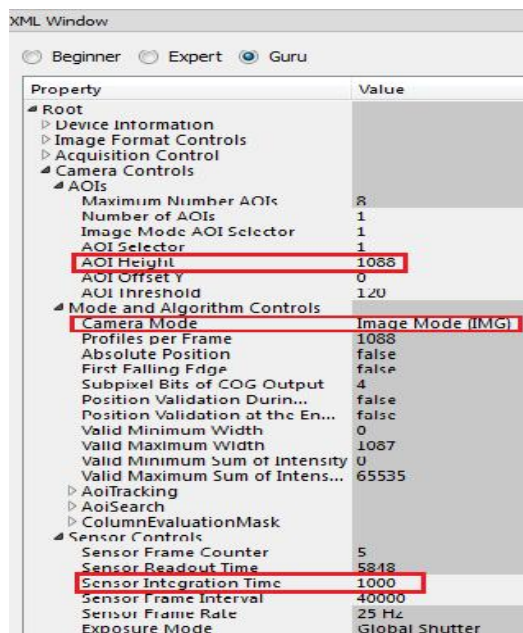
6.1 Resultados de laboratorio

6.1.1 Cámara

Los primeros ajustes de la cámara se centran en configurar la región de interés deseable, en el modo de imagen, para este caso en 2D image mode (IMG). También se fija el parámetro del tiempo de integración del sensor que es el tiempo en que este permanece expuesto a la luz.

En la Figura 19 se muestra la lista desplegable del software Cx-explorer. En esta lista se puede elegir los parámetros según conveniencia del usuario. De esta lista se destacan: los parámetros de altura de la región de interés (AOI Height) de la sección AOIs; modo de operación de la cámara (Camera Mode) de la sección algoritmos específicos de operación en 2D o 3D (Mode and Algorithm controls); y el parámetro de sensor que corresponde al tiempo de integración (integration time) de la sección control de sensor (sensor controls).

Figura 19. Panel de configuración Cx_explorer.



The screenshot shows the 'XML Window' configuration panel for Cx-explorer. It features three radio buttons at the top: 'Beginner', 'Expert', and 'Guru' (which is selected). Below is a tree view of properties with a corresponding 'Value' column. Several rows are highlighted with red boxes: 'AOI Height' (1088), 'Camera Mode' (Image Mode (IMG)), and 'Sensor Integration Time' (1000).

Property	Value
Root	
Device Information	
Image Format Controls	
Acquisition Control	
Camera Controls	
AOIs	
Maximum Number AOIs	8
Number of AOIs	1
Image Mode AOI Selector	1
AOI Selector	1
AOI Height	1088
AOI Offset Y	0
AOI Threshold	120
Mode and Algorithm Controls	
Camera Mode	Image Mode (IMG)
Profiles per Frame	1088
Absolute Position	false
First Falling Edge	false
Subpixel Bits of COG Output	4
Position Validation Durin...	false
Position Validation at the En...	false
Valid Minimum Width	0
Valid Maximum Width	1087
Valid Minimum Sum of Intensity	0
Valid Maximum Sum of Intens...	65535
AoiTracking	
AoiSearch	
ColumnEvaluationMask	
Sensor Controls	
Sensor Frame Counter	5
Sensor Readout Time	5848
Sensor Integration Time	1000
Sensor Frame Interval	40000
Sensor Frame Rate	25 Hz
Exposure Mode	Global Shutter

Para las pruebas de laboratorio se realizó el montaje de la Figura 20, teniendo en cuenta las distancias de la geometría seleccionada para el sistema de escaneo y se elaboraron dos patrones de calibración: el primero de ellos un cubo con dimensiones de 10cm, como se muestra en la Figura 21, el segundo está, compuesto por cuatro triángulos de base 50x10cm y de alto 5cm como se muestra en la Figura 22.

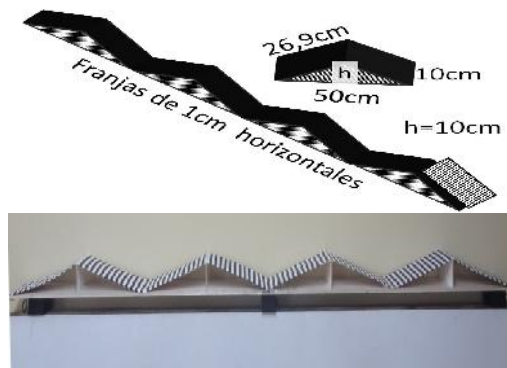
Figura 20. Montaje laboratorio.



Figura 21. Patrón de calibración cubo.



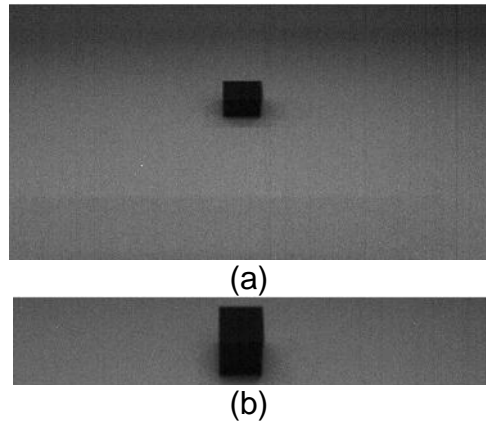
Figura 22. Patrón de calibración piramidal.



Con estos patrones se tomaron secuencias de imágenes para efectos de familiarización con el software, con diferentes regiones de interés y tiempo de

integración en 2D. La claridad de la imagen se ve afectada por el filtro óptico. Por tal razón para poder observar los patrones el ajuste del tiempo de integración fue de $10000\mu\text{s}$, (ver Figura 23).

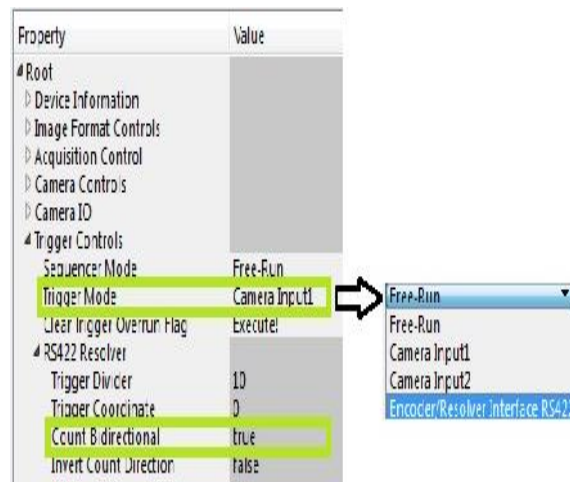
Figura 23. Imágenes captadas con el software Cx_Explorer, para regiones de interés de (a) 2048×1088 píxeles y (b) 2048×200 píxeles, con tiempo de integración de $10000\mu\text{s}$.



6.1.2 Integración cámara-codificador rotatorio

Para integrar el codificador rotatorio con la cámara se configura el modo de disparo o trigger de la cámara en el software Cx-Explorer. La configuración se muestra en la Figura 24.

Figura 24. Parámetros selección de disparo o trigger.



La cámara posee dos tipos de disparo: uno por entrada de onda cuadrada en el puerto IN1 o IN2 de la bornera de conexión de la cámara por los puertos A+, A-,

B+, B-, y el otro como modo de RS422 para disparo en cuadratura (como se muestra en la Figura 25).

Figura 25. Bornera C4-2040



Bornera C4-2040. [18].

El modo de disparo por puertos IN1 o IN2 consiste en una entrada de señal cuadrada de amplitud máxima de 24V y mínima de 3V. Se reconoce mayor de 3V como flanco de subida y menor a 3V como cero.

En el modo RS422 el disparo se hace en cuadratura, para identificar el sentido de giro del codificador y no sobre-muestrear en caso de un giro inverso. La tabla 7 resume los parámetros más importantes de configuración.

Parámetro	Configuración	Descripción
Tipo de algoritmo	Modo imagen (IMG)	Imágenes en dos dimensiones
Región de interés	Alturas de la region de interes.	Ancho de imagen desde 1 pixel hasta 1088 pixeles
Control de sensor	Tiempo de integracion del sensor	Tiempo de exposición del sensor a la luz

Tabla 7. Parámetros de configuración cámara.

El siguiente paso es realizar pruebas en las que se varían los parámetros de región de interés y tiempo de integración del sensor, para caracterizar la integración de los dos dispositivos. Como se evidencia en las tablas 8-10 el parámetro ROI afecta la rata de adquisición de imágenes de manera tal que con una región de interés de 2048x5 y un tiempo de integración de 4us, la rata de adquisición es de 218 frames por segundo, siendo esta la mayor tasa de adquisición del sistema en el laboratorio a una velocidad máxima del vehículo de 10km/h.

tiempo de integracion	ROI	periodo adecuado señal de disparo	max # frames por segundo	# de imágenes capturadas en 10 segundos				
				periodo de la señal de disparo				
				500ms	125ms	31.25ms	14.7ms	1.47ms
100000us	2048x1061	125ms	10	10./10	40./40	103./160	104./340	103./3400
	2048x797	125ms	10	10./10	40./40	103./160	103./340	103./3400
	2048x533	125ms	10	10./10	40./40	102./160	102./340	102./3400
	2048x269	125ms	10	10./10	40./40	102./160	102./340	102./3400
	2048x5	125ms	10	10./10	40./40	102./160	102./340	102./3400

Tabla 8. Datos Pruebas de laboratorio 100.000us.

tiempo de integracion	ROI	periodo adecuado señal de disparo	max # frames por segundo	# de imágenes capturadas en 10 segundos				
				periodo de la señal de disparo				
				500ms	125ms	31.25ms	14.7ms	1.47ms
10000us	2048x1061	31.25ms	18	10./10	40./40	160./160	181./340	175./3400
	2048x797	31.25ms	23	10./10	40./40	160./160	233./340	231./3400
	2048x533	14.7ms	34	10./10	40./40	160./160	340./340	343./3400
	2048x269	14.7ms	66	10./10	40./40	160./160	340./340	666./3400
	2048x5	14.7ms	94	10./10	40./40	160./160	340./340	946./3400

Tabla 9. Datos Pruebas de laboratorio 10.000us.

tiempo de integracion	ROI	periodo adecuado señal de disparo	max # frames por segundo	# de imágenes capturadas en 10 segundos				
				periodo de la señal de disparo				
				500ms	125ms	31.25ms	14.7ms	1.47ms
4us	2048x1061	31.25ms	17	10./10	40./40	160./160	164./340	170./3400
	2048x797	31.25ms	22	10./10	40./40	160./160	229./340	244./3400
	2048x533	14.7ms	34	10./10	40./40	160./160	340./340	340./3400
	2048x269	14.7ms	65	10./10	40./40	160./160	340./340	654./3400
	2048x5	14.7ms	218	10./10	40./40	160./160	340./340	2181./3400

Tabla 10. Datos Pruebas de laboratorio 4us

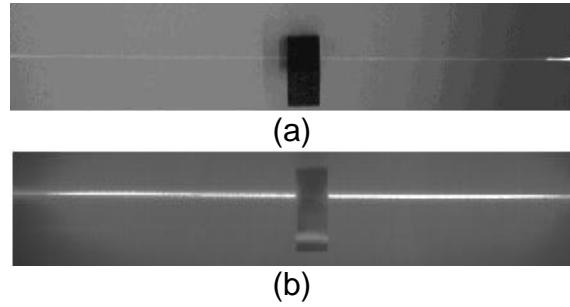
6.1.3 LÁSER

De este dispositivo lo más importante es la seguridad visual en el momento de manipulación, pues su alta potencia podría ocasionar daños en la retina. Por esta razón cuenta con varios sistemas de seguridad y debe ser siempre operado con lentes de protección de 810nm. Para encender el láser se debe activar el interruptor principal, girar la llave, encender el interruptor de mando a distancia y ajustar la potencia.

La potencia del láser se ajusta por medio de modulación digital en su entrada con un conector DB-9 ubicado en su parte posterior, mediante un voltaje entre 0 y 5V analógico. También posee un lente para ajustar su nitidez de acuerdo a la escena de proyección.

En la Figura 26 (a) se observa la potencia de proyección láser para una modulación de 0V, mientras en la Figura 26 (b) se evidencia un aumento en la potencia correspondiente con una modulación de 5V.

Figura 26. Ajuste potencia láser, a)modulación 0V, b)modulación 5V.



8.2 Resultados campo

6.2.1 Montaje del sistema

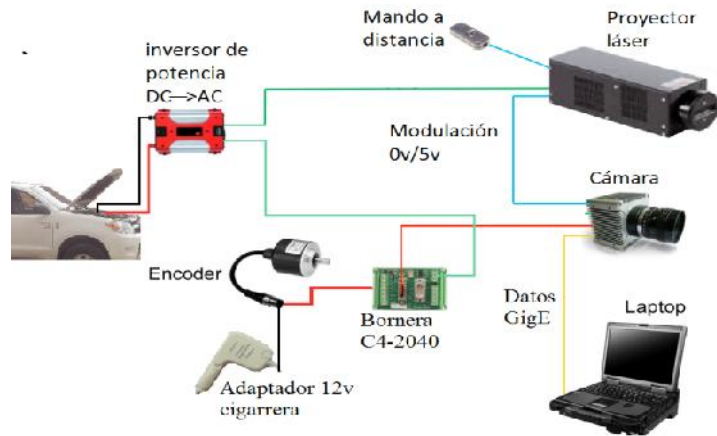
El montaje del sistema se divide en 4 fases: en la primera fase se asegura la estructura a la camioneta; en la segunda, se procede con el montaje y calibración de los dispositivos de acuerdo con la geometría determinada como se muestra en la Figura 27.

Figura 27. Montaje sistema primera y segunda fase



La tercera fase trata de la conexión de los dispositivos como se observa en la Figura 28. Por último, en la cuarta fase se carga la configuración en la cámara y se ejecuta la adquisición de imágenes.

Figura 28. Diagrama de conexión tercera fase.



6.2.2 Escaneo

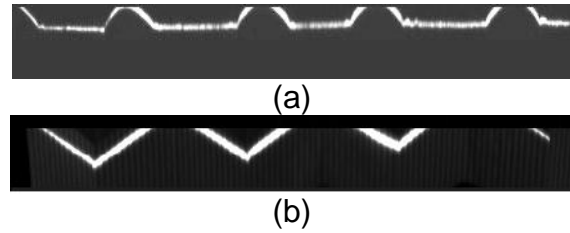
En la Figura 29 se observa el patrón de calibración piramidal y su versión escaneada esto para ajuste del sistema en campo.

Figura 29. Patrón de calibración piramidal.



La región de interés va ligada a las alturas o profundidades que se encuentran en los tipos de daño. Cada altura o profundidad causa una determinada deformación en el patrón láser proyectado y esto se debe tener en cuenta en el momento de configuración de este parámetro pues puede ocasionar pérdida de información como se observa en la Figura 30.

Figura 30. Resultados de región de interés muy pequeña respecto de la escena.



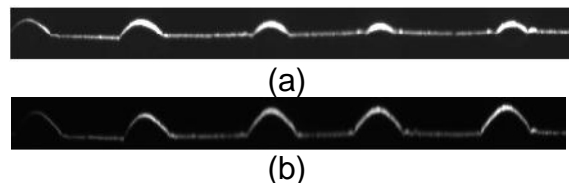
Las escenas de la Figura 31a se determinaron por su efecto en la deformación del patrón láser, como grietas pronunciadas y reductoras de velocidad encontrados en el campus de la Universidad Industrial de Santander.

Para escanear dichas escenas, los parámetros de configuración de la cámara se fijaron en una región de interés 2048x102 y un tiempo de integración 150us. Sus respectivos resultados se encuentran en la Figura 32 (a) correspondiente a la parte baja de la serie de estoperoles y (b) punto medio correspondiente a la altura máxima del estoperol. Estas pruebas fueron realizadas en día soleado y como se evidencia en las Figuras 32 y 33 los datos adquiridos arrojan resultados aceptables para el sistema.

Figura 31. Escenas, grieta pronunciada y estoperoles.

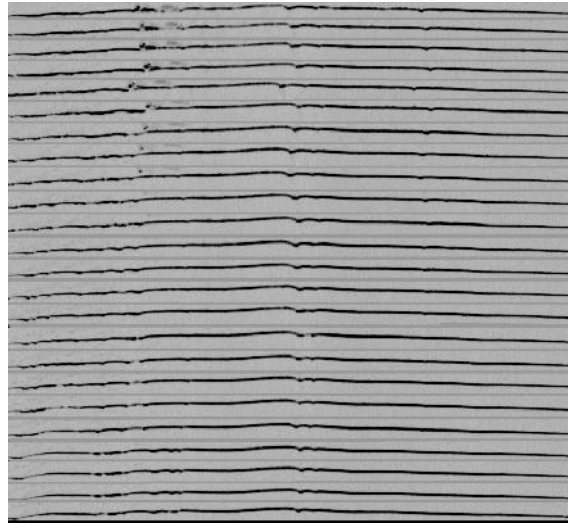


Figura 32. Escaneo de reductores de velocidad (estoperoles), (a) comienzo del escaneo, (b) punto medio del estoperol (altura máxima).



En la Figura 33 se presenta una secuencia de imágenes del patrón láser deformado sobre la grieta pronunciada, de abajo hacia arriba respecto de esta imagen. La variación es casi imperceptible teniendo en cuenta que son captados cada 1mm.

Figura 33. Secuencia de imágenes respectivas del escáner de la grieta pronunciada de la Figura 31.



CONCLUSIONES

- La capacidad del sensor de la cámara para capturar información en periodos cortos de tiempo y en conjunto con la calidad de la proyección láser, hicieron posible obtener la precisión de 1mm en las tres dimensiones. No obstante los defectos que se pueden presentar en esta precisión son debidos a una intensidad alta de luz solar, pudiendo ser corregidos en una nueva configuración de la cámara específicamente en el parámetro de tiempo de integración.
- Es posible mejorar la limitante de velocidad si el dispositivo de captura de imágenes posee integrado un software para ajuste automático de tiempo de integración dependiendo de la condición de iluminación de cada escena, teniendo claro que al ser un sistema enfocado a las superficies pavimentadas, las condiciones ambientales no son controladas.
- En el proceso de integración tecnológica, es importante tener claros todos los factores que intervienen en el problema a solucionar. En este caso son la incidencia de factores ambientales, velocidad de desplazamiento, afectación a la población, y los que pueden tener incidencia al momento de seleccionar los dispositivos.
- La integración tecnológica de diversos dispositivos comerciales, es posible en la medida de las exigencias del problema a tratar. Si se exige un alto grado de efectividad al sistema a implementar, la integración tecnológica no sería viable con dispositivos del mercado, por tal razón se deberían diseñar algunos de los dispositivos que integran el sistema general.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] South Dakota Department of Transportation, "SDDOT'S ENHANCED PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM, VISUAL DISTRESS SURVEY MANUAL," United States of America, 2009.
- [2] Transportation Research Board, *Automated Pavement Distress Collection Techniques*, vol. 334. Washington, D.C: Transportation Research Board National Research, 2004.
- [3] J. França, M. Gazziro, A. Ide, and J. Saito, "A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view," in *Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference on*, 2005, pp. 3–6.
- [4] X. Yu, "Pavement Surface Distress Detection and Evaluation Using Image Processing Technology," no. May. The University of Toledo, Ohio, pp. 19–21;56–58, 2011.
- [5] U. I. de S. Geomatica, "SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE VÍAS PAVIMENTADAS," 2013.
- [6] M. de transporte (INVIAS), "Resolución 0001240_2013." Colombia, p. 32, 2013.
- [7] M. De and Transporte, "Codigo de tránsito Colombia." [Online]. Available: <http://www.colombia.com/noticias/codigotransito/>. [Accessed: 12-Jul-2013].
- [8] "En la ciudad hay cuatro límites de velocidad." [Online]. Available: <http://www.vanguardia.com/historico/20798-en-la-ciudad-hay-cuatro-limites-de-velocidad>. [Accessed: 12-Feb-2013].
- [9] J. Laurent, J. F. Hébert, D. Lefebvre, and Y. Savard, "Using 3D laser profiling sensors for the automated measurement of road surface conditions (ruts, macro-texture, raveling, cracks).," Canada, 2009.
- [10] J. C. Ramírez Rojas, "Reconstrucción tridimensional de la sección transversal de perfiles extruidos utilizando triangulación láser." Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [11] A. Patiño Vanegas, "Sistema óptico para la extracción de parámetros metrológicos del pie," Universidad Industrial de Santander, 2004.
- [12] H. D. y R. A. F. YOUNG, *Física universitaria con física moderna*. Mexico, 2009, p. 896.
- [13] A. Creus Solé, *Instrumentación industrial*, 6a. ed. Barcelona, España: ALFAOMEGA S.A, 1997, p. 847.
- [14] P. Tv, "DTV y HDTV Tabla Comparativa." [Online]. Available: <http://plasmatvbuyingguide.com/dtv-hdtv-comparison19.html>. [Accessed: 20-Dec-2012].
- [15] P. Central, "The Difference Between HDTV, EDTV, and SDTV," 2003. [Online]. Available: http://www.projectorcentral.com/video_signals.htm. [Accessed: 20-Dec-2013].
- [16] Total TurnKey solutions, "GigE Vision - Emerging Standard for Machine Vision Cameras," 2008. [Online]. Available: http://www.turnkey-solutions.com.au/cam_prosilica_gige.htm. [Accessed: 20-Mar-2013].
- [17] Cimco, "Estándares de comunicación serie," 2012. [Online]. Available: http://www.cimco.com/docs/cimco_dnc-max/v6/es/#SerialComStandards.

- [18] Automation Technology GmbH, "C4-2040-GigE Camera Hardware Reference Manual." Bad Oldesloe, Alemania, p. 56, 2012.
- [19] Schäfter+Kirchhoff GmbH, "Lenses for Line Scan cameras," Hamburg, Germany, 2011.
- [20] L. RICOH IMAGING COMPANY, "A guide to lens selection," no. Dc, pp. 56–70, 2009.
- [21] STEMMER IMAGING, "For FA/Machine Vision." [Online]. Available: <http://www.stemmer-imaging.co.uk/en/products/series/Fujinon.HA#tags/Manual-LensC-Mount>. [Accessed: 28-Mar-2014].
- [22] John M. Horack, "Funcionario Responsable de NASA:," *Dr. Tony Phillips. Curador Bryan Walls*.
- [23] Laserglow Technologies, "LRD-0808-PFN SERIES INFORMATION SHEET." pp. 1–3, 2009.
- [24] COHERENT, "Hoja de datos Lasiris Magnum II." United States, pp. 76–79, 2009.
- [25] MCBtec, "Funcionamiento_Encoder," *EL ENCODER*, 2008. [Online]. Available: <http://www.mcbtec.com/>. [Accessed: 23-Jul-2013].
- [26] Bosch, "Motores de Arranque y Alternadores 2012 I 2013," Campinas, 2013.
- [27] Aficionados de la mecanica, "Alternadores y reguladores de tension," 2012. [Online]. Available: <http://www.aficionadosalamecanica.net/alternador.htm>. [Accessed: 27-Mar-2014].

BIBLIOGRAFIA

South Dakota Department of Transportation, "SDDOT'S ENHANCED PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM, VISUAL DISTRESS SURVEY MANUAL," United States of America, 2009.

J. C. Ramírez Rojas, "Reconstrucción tridimensional de la sección transversal de perfiles extruidos utilizando triangulación láser." Universidad Industrial de Santander, 2011.

A. Patiño Vanegas, "Sistema óptico para la extracción de parámetros metrológicos del pie," Universidad Industrial de Santander, 2004.

H. D. y R. A. F. YOUNG, Física universitaria con física moderna. Mexico, 2009, p. 896.

A. Creus Solé, Instrumentación industrial, 6a. ed. Barcelona, España: ALFAOMEGA S.A, 1997, p. 847.

P. Tv, "DTV y HDTV Tabla Comparativa." [Online]. Available: <http://plasmatvbuyingguide.com/dtv-hdtv-comparison19.html>. [Accessed: 20-Dec-2012].

P. Central, "The Difference Between HDTV, EDTV, and SDTV," 2003. [Online]. Available: http://www.projectorcentral.com/video_signals.htm. [Accessed: 20-Dec-2013].

Total TurnKey solutions, "GigE Vision - Emerging Standard for Machine Vision Cameras," 2008. [Online]. Available: http://www.turnkey-solutions.com.au/cam_prosilica_gige.htm. [Accessed: 20-Mar-2013].

Cimco, "Estándares de comunicación serie," 2012. [Online]. Available: http://www.cimco.com/docs/cimco_dnc-max/v6/es/#SerialComStandards.

Automation Technology GmbH, "C4-2040-GigE Camera Hardware Reference Manual." Bad Oldesloe, Alemania, p. 56, 2012.

Schäfter+Kirchhoff GmbH, "Lenses for Line Scan cameras," Hamburg, Germany, 2011.

Transportation Research Board, Automated Pavement Distress Collection Techniques, vol. 334. Washington, D.C: Transportation Research Board National Research, 2004.

L. RICOH IMAGING COMPANY, "A guide to lens selection," no. Dc, pp. 56–70, 2009.

STEMMER IMAGING, "For FA/Machine Vision." [Online]. Available: <http://www.stemmer-imaging.co.uk/en/products/series/Fujinon.HA#tags/Manual-Lens|C-Mount>. [Accessed: 28-Mar-2014].

John M. Horack, "Funcionario Responsable de NASA:," Dr. Tony Phillips. Curador Bryan Walls.

Laserglow Technologies, "LRD-0808-PFN SERIES INFORMATION SHEET." pp. 1–3, 2009.

COHERENT, "Hoja de datos Lasiris Magnum II." United States, pp. 76–79, 2009.

MCBtec, "Funcionamiento Encoder," EL ENCODER, 2008. [Online]. Available: <http://www.mcbtec.com/>. [Accessed: 23-Jul-2013].

Bosch, "Motores de Arranque y Alternadores 2012 I 2013," Campinas, 2013.

Aficionados de la mecanica, "Alternadores y reguladores de tension," 2012. [Online]. Available: <http://www.aficionadosalamecanica.net/alternador.htm>. [Accessed: 27-Mar-2014].

J. França, M. Gazziro, A. Ide, and J. Saito, "A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view," in Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference on, 2005, pp. 3–6.

X. Yu, "Pavement Surface Distress Detection and Evaluation Using Image Processing Technology," no. May. The University of Toledo, Ohio, pp. 19–21;56–58, 2011.

U. I. de S. Geomatica, "SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE VÍAS PAVIMENTADAS," 2013.

M. de transporte (INVIAS), "Resolución 0001240_2013." Colombia, p. 32, 2013.

M. De and Transporte, "Codigo de tránsito Colombia." [Online]. Available: <http://www.colombia.com/noticias/codigotransito/>. [Accessed: 12-Jul-2013].

"En la ciudad hay cuatro límites de velocidad." [Online]. Available: <http://www.vanguardia.com/historico/20798-en-la-ciudad-hay-cuatro-limites-de-velocidad>. [Accessed: 12-Feb-2013].

J. Laurent, J. F. Hébert, D. Lefebvre, and Y. Savard, "Using 3D laser profiling sensors for the automated measurement of road surface conditions (ruts, macro-texture, raveling, cracks).," Canada, 2009.