

**SISTEMA DE MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTO EN DOS EJES  
BASADO EN TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL**



**ZULMA BERNARDA PABÓN PIPICANO  
ANCIZAR SANTACRUZ AHUMADA**

**Monografía de trabajo de grado**

**Director**

**I. E. Juan Fernando Flórez Marulanda**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL  
POPAYÁN  
2007**

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>10</b>
<b>1. ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN EN EL CAMPO DE LA SALUD ESTRUCTURAL</b>	<b>12</b>
<b>1.1. SENSORES APLICADOS AL MONITOREO DE ESTRUCTURAS CIVILES</b>	<b>12</b>
1.1.1. INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO	13
1.1.2. RADAR DE PENETRACIÓN	14
1.1.3. RADIOGRAFÍAS	15
1.1.4. MONITOREO DE VIBRACIONES	16
1.1.5. SENSORES ÓPTICOS	17
1.1.6. SENSORES DE IMAGEN - VISIÓN ARTIFICIAL	21
<b>1.2. ESTRUCTURAS INTELIGENTES</b>	<b>23</b>
<b>1.3. ESTADO DEL MONITOREO DE PUENTES EN COLOMBIA</b>	<b>25</b>
<b>2. DISEÑO DEL ALGORITMO DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES PARA MEDIR DESPLAZAMIENTOS</b>	<b>28</b>
<b>2.1. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS</b>	<b>28</b>
2.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL OBJETO A MEDIR	30
2.1.2. PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DEL ALGORITMO	31
<b>2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ALGORITMO DE PROCESAMIENTO</b>	<b>32</b>
<b>2.3. ADQUISICIÓN DE LA IMAGEN</b>	<b>35</b>
2.3.1. ALMACENAMIENTO DE LA IMAGEN EN MEMORIA	35
2.3.2. FILTRO DE COLOR	36
<b>2.4. SEGMENTACIÓN POR UMBRALIZACIÓN</b>	<b>38</b>
<b>2.5. FILTRO MORFOLÓGICO.</b>	<b>39</b>
2.5.1. EROSIÓN DE OBJETOS	40

2.5.2.	DILATACIÓN DE OBJETOS	40
<b>2.6.</b>	<b>CÓDIGO RLE</b>	<b>41</b>
2.6.1.	CODIFICACIÓN RLE	41
2.6.2.	ETIQUETAMIENTO DE LA IMAGEN	43
<b>2.7.</b>	<b>FILTRO DE ÁREA</b>	<b>44</b>
2.7.1.	MEDIDA DE ÁREA DE LOS OBJETOS ETIQUETADOS	44
2.7.2.	REMOVER OBJETOS PEQUEÑOS	45
<b>2.8.</b>	<b>EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS</b>	<b>46</b>
2.8.1.	CÁLCULO DEL CENTROIDE DEL OBJETO RESULTANTE	46
2.8.2.	EXTRACCIÓN DE UNA SUBIMAGEN O REGIÓN DE INTERÉS ROI	47
<b>2.9.</b>	<b>EXTRACCIÓN DE LÍNEAS EJE POR TRANSFORMADA DE HOUGH</b>	<b>49</b>
2.9.1.	EROSIÓN POR INTERMEDIO DEL CÓDIGO RLE	50
2.9.2.	APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE HOUGH PARA RECTAS.	51
2.9.3.	DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS REPRESENTATIVOS	52
2.9.4.	IDENTIFICACIÓN DE INTERSECCIONES ENTRE RECTAS	53
<b>2.10.</b>	<b>INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>55</b>
2.10.1.	MEDIR DISTANCIAS ENTRE LÍNEAS	55
2.10.2.	COMPARAR CENTROS CON CENTROIDE	57
2.10.3.	APLICACIÓN DE UN FILTRO DE MEDIA MÓVIL	58
<b>3.</b>	<b>DISEÑO DE UN SISTEMA PROTOTIPO PARA MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN UNA ESTRUCTURA</b>	<b>60</b>
<b>3.1.</b>	<b>FUENTE DE LUZ</b>	<b>60</b>
<b>3.2.</b>	<b>SENSOR DE IMAGEN</b>	<b>62</b>
<b>3.3.</b>	<b>INTERFAZ DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES</b>	<b>64</b>
<b>3.4.</b>	<b>ALGORITMOS DE ANÁLISIS DE IMAGEN</b>	<b>66</b>
3.4.1.	ADQUISICIÓN	66
3.4.2.	SEGMENTACIÓN	67
3.4.3.	ACONDICIONAMIENTO DE LA IMAGEN BINARIA	69
3.4.4.	EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS	72

3.4.5. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	74
<b>3.5. MOTOR DE PROCESAMIENTO</b>	<b>76</b>
<b>3.6. COSTO COMPUTACIONAL</b>	<b>77</b>
<b>4. EVALUACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO</b>	<b>80</b>
<b>4.1. PRUEBAS Y RESULTADOS</b>	<b>80</b>
4.1.1. MÓDULO DE PRUEBAS:	81
4.1.2. INTERVALO DE MEDIDA (RANGO)	83
4.1.3. ALCANCE (SPAN)	83
4.1.4. ERROR	84
4.1.5. REPETIBILIDAD Y PRECISIÓN	86
4.1.6. EXACTITUD	87
4.1.7. LINEALIDAD	88
4.1.8. FUENTES DE RUIDO	88
<b>4.2. POSIBLES APLICACIONES</b>	<b>89</b>
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>91</b>
<b>6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>94</b>
<b>6.1. RECOMENDACIONES</b>	<b>94</b>
<b>6.2. TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>94</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>96</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Condiciones para validar las medidas de centro obtenidas	75
Tabla 2. Variables utilizadas y su asignación en el programa	78
Tabla 3. Carga computacional de las funciones y procesos	79
Tabla 4. Medida de error en pasos de 1mm.	84
Tabla 5. Medida de error en pasos de 500 $\mu$ m	85
Tabla 6. Medida de error en pasos de 50 $\mu$ m	86
Tabla 7. Cálculo de repetibilidad	87

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Principio de operación del Radar de Penetración	14
Ilustración 2. Representación esquemática de una Tomografía Computarizada	16
Ilustración 3. Montaje experimental para medida de desplazamiento basado en pérdidas por curvatura	19
Ilustración 4. Esquema de funcionamiento LDDM	21
Ilustración 5. Esquema Cámara de Huecos Taladrados	22
Ilustración 6. Ejemplo de un sistema de visión artificial para medir deflexiones en puentes	29
Ilustración 7. Esquema del objeto solidario formado por una arreglo de luces.	30
Ilustración 8. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto para el procesamiento de imágenes	34
Ilustración 9. Sistema de coordenadas cartesianas utilizadas referidas a la imagen.	35
Ilustración 10. Histograma de la imagen antes y después del filtro de color	38
Ilustración 11. Ejemplo de codificación RLE	42
Ilustración 12. Ejemplo de etiquetamiento de objetos sobre código RLE	43
Ilustración 13. Disposición de las dimensiones del objeto calculables en la imagen	56
Ilustración 14. Dimensiones del objeto observado generado a partir de la fuente de luz	61
Ilustración 15. Descripción del módulo de iluminación y objeto observado	62
Ilustración 16. Conexión de la pasarela entre el DSP y la cámara	65

Ilustración 17. Comparación entre la imagen original y la filtrada por color	67
Ilustración 18. Histograma de la imagen filtrada por color	68
Ilustración 19. Imagen segmentada por umbralización automática	69
Ilustración 20. Imagen binaria filtrada morfológicamente	70
Ilustración 21. Imagen etiquetada y filtrada mediante el código RLE	72
Ilustración 22. Comparación entre el centroide y el centro del rectángulo ROI	73
Ilustración 23. Líneas eje obtenidas por transformada simplificada de Hough	74
Ilustración 24. Esquema del montaje de pruebas para el prototipo	81
Ilustración 25. Imagen vista por la cámara del sistema con el campo de visión ampliado	82

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo A: MODELO DE DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN PARA EL PROTOTIPO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFLEXIONES EN DOS EJES

Anexo B: MANUAL DE USUARIO DEL PROTOTIPO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFLEXIONES EN DOS EJES USANDO TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL

Anexo C: INTRODUCCIÓN A LOS DSP

Anexo D: GUÍA DE REFERENCIA PARA PROGRAMACIÓN DEL DSK TMS320C6416T

## RESUMEN

En este documento se describe el desarrollo de un sistema para medir el desplazamiento de estructuras civiles utilizando técnicas de visión artificial en ambientes de iluminación poco controlada haciendo uso de un motor de procesamiento de alto desempeño y algoritmos basados en compresión de datos.

Con intención de describir el entorno de la solución, en el capítulo 1 se describen algunos sistemas y métodos de inspección de estructuras civiles enfocados en puentes y en las últimas tecnologías ópticas y de materiales inteligentes y se hace un esbozo sobre el estado de la salud estructural en Colombia para poner en contexto el sistema. En el capítulo 2 se describe el diseño del algoritmo de medición de desplazamiento, partiendo de los requerimientos del sistema, la identificación del objeto a observar y las herramientas conceptuales hasta esbozar un modelo de solución que pueda ser implementado en la plataforma de trabajo. En el capítulo 3 se describe la implementación del algoritmo diseñado en el capítulo 2, teniendo en cuenta las características reales del objeto a medir, el sensor de imágenes, el procesador y la carga computacional que genera el algoritmo. En el capítulo 4 se describen y analizan los resultados obtenidos al probar el sistema prototipo con el propósito de establecer su entorno de trabajo y finalmente se consignan las experiencias sobresalientes del desarrollo del proyecto y las expectativas para trabajos futuros.

Palabras claves: Salud Estructural, Visión artificial, algoritmos SRI, compresión RLE, DSP

## INTRODUCCIÓN

Con el auge de técnicas modernas de inspección de estructuras civiles en el País y la incursión del concepto de salud estructural en esta área, cada vez son mas las personas interesadas en desarrollar instrumentos que faciliten un monitoreo constante, eficiente y confiable adecuado a las condiciones ambientales y de ingeniería presentes en el País. Algunas universidades han desarrollado diversos sistemas para el monitoreo de fallas en puentes, siguiendo la tendencia mundial de darles a estas estructuras capacidad de monitorear su comportamiento y el entorno que lo rodea e incluso adaptarse al medio, al incorporar dispositivos de procesamiento de datos e inteligencia artificial. La universidad del Cauca en un primer intento por incursionar en el nicho de la salud estructural inició estudios sobre la instrumentación adecuada para medir las cargas dinámicas que soportan los puentes metálicos. De estos avances surgió el interrogante de cómo construir un sistema propio con tecnología disponible capaz de medir efectivamente las deflexiones causadas por esas cargas.

*El Sistema de Medición de Desplazamiento en Dos Ejes Basado en Técnicas de Visión Artificial* es una primera aproximación al desarrollo de sistemas de visión de máquina para ambientes exteriores, con el objetivo de ofrecer un instrumento para monitorear puntos específicos en una estructura civil.

El sistema combina dos tecnologías al utilizar procesadores de señal de alto desempeño con técnicas de visión por computador. Los DSP son dispositivos que permiten el desarrollo de aplicaciones complejas que consumen recursos computacionales elevados y pueden dar respuesta en tiempo real. Por su parte, las imágenes son una de las formas de información más costosa de procesar y está compuesta de millones de datos. No es en vano la afirmación “una imagen vale mas que mil palabras”, pues aunque el contenido de una imagen es enorme el costo por interpretarla es elevado y allí los DSP ofrecen una buena solución. Sin embargo, los DSP como cualquier otro procesador tienen recursos limitados por lo que no se puede implementar sobre ellos un algoritmo de procesamiento tan grande como se desee, sino que se debe balancear efectividad y desempeño.

El punto de convergencia entre el uso adecuado de los DSP y el procesamiento de imágenes lo ofrecen los algoritmos SRI, una técnica que parte de la compresión sin pérdidas y la interpretación de información implícita en la compresión. Así, al procesar menos datos se reduce el uso de memoria y se aumenta la velocidad de trabajo.

El proyecto ofrece una solución inicial al problema de la instrumentación de puentes para medir deformaciones por cargas, una necesidad que requería del uso de acelerómetros de muy alta sensibilidad en frecuencias cercanas a DC y de galgas extensiométricas instaladas en los puntos de acceso al puente; ambos sistemas difíciles de implementar, calibrar y mantener por la cantidad de circuitos electrónicos necesarios para procesar la señal. La solución propuesta compite con otras tecnologías de vanguardia como los sistemas de medida por fibra óptica basados en Rejillas de Bragg, pero tiene la ventaja de poder ser instalada en diversas estructuras ya construidas a diferencia de la fibra óptica que debe ser instalada al momento de la construcción. La solución expuesta en esta monografía procura facilitarle al usuario la instalación y calibración del sistema a la vez que se le ofrecen medidas confiables y a un costo eficiente.

## **1. ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN EN EL CAMPO DE LA SALUD ESTRUCTURAL**

La evolución constante de la electrónica aplicada ha favorecido diferentes campos de la ciencia, la ingeniería y el desarrollo social. Hoy en día se puede observar aplicaciones electrónicas en medicina, en el sector industrial, en las fuerzas militares, el campo espacial y aeronáutico, las investigaciones científicas, las comunicaciones y hasta la lúdica, por citar algunos. Esta dinámica hace que se busquen nuevos nichos de aplicación y en las últimas décadas uno de esos nichos ha sido la salud estructural, una rama de la ingeniería civil que se vale de instrumentos electrónicos y electromecánicos para observar el desempeño de las estructuras para poder evaluarlas constantemente y hacer mantenimiento preventivo.

Cada día se evoluciona en los aspectos de diseño y construcción de obras civiles, por ello los proyectos que se presentan para todo tipo de estructuras son cada vez más innovadores, logrando que las nuevas obras y estructuras sean más grandes y complejas. Esto hace que los métodos de cálculo y diseño tradicionales necesiten continuas puestas al día, lo mismo que las técnicas clásicas de monitorización. Es por ello que existe, desde hace unos años, la creciente necesidad de encontrar nuevas técnicas que permitan conocer el comportamiento de las estructuras diseñadas de la manera más fiable posible y durante la mayor cantidad de tiempo (Jáuregui, s.f.).

### **1.1. SENSORES APLICADOS AL MONITOREO DE ESTRUCTURAS CIVILES**

Los métodos de salud estructural requieren del uso de diversos sistemas de monitoreo y sensores para medir múltiples variables de las estructuras como: puntos de estrés, modos vibratorios, resistencia mecánica, flexibilidad o temperatura, con el objetivo de detectar y atender fallas tempranamente. Existen tantos sensores como variables a monitorear y por eso, para inspeccionar una estructura se aplican métodos donde se combinan varios de ellos para obtener medidas más precisas, también se combinan métodos para obtener la

mayor cantidad de información posible, verificar la veracidad de las medidas y cubrir la mayor cantidad de situaciones posibles que afecten a la estructura.

En esta sección se describirán algunos sistemas y métodos de inspección de estructuras civiles, la mayoría enfocados en puentes y con las últimas tecnologías especialmente ópticas y de materiales inteligentes (Carrión et al, 2003).

### **1.1.1. Inspección por ultrasonido**

La inspección por ultrasonido es una de las técnicas de inspección no destructiva (IND) más poderosas, ya que permite localizar y cuantificar el tamaño de los defectos internos para diferentes tipos de geometrías y materiales. En general, el procedimiento es relativamente sencillo, y no representa riesgo para el inspector o para el material. Existe una diversidad de técnicas que se pueden adaptar a cada aplicación en particular.

La inspección por ultrasonido mide en varios puntos el efecto del paso de las ondas acústicas de alta frecuencia a través del material de la pieza que se evalúa. Dicha propagación se controla electrónicamente por pulsos que un transductor convierte en energía acústica que se aplica en puntos específicos. Posteriormente, el mismo transductor u otro similar, recibe el reflejo de esa onda acústica y la convierte nuevamente en una señal eléctrica. La interpretación del reflejo de dicha onda sonora permite inferir información sobre discontinuidades en el material. Debido a que las ondas sonoras viajan en casi todos los materiales, esta técnica es una de las más empleadas en la identificación de defectos internos.

Dentro de las técnicas de inspección por ultrasonido encontramos la técnica por emisión acústica (EA) que es una técnica de evaluación no destructiva que escucha el sonido emitido por el material al aplicarle un estímulo magnético, térmico o mecánico y ubica la fuente del mismo. En general no determina el tamaño del defecto pero localiza fácilmente los puntos con potencial daño y que requieren una inspección mas detallada mediante otras técnicas (Carrión et al, 2003). Esta técnica es usada especialmente para identificar grietas, velocidad de crecimiento de grietas, fatiga y corrosión en metales, aceros

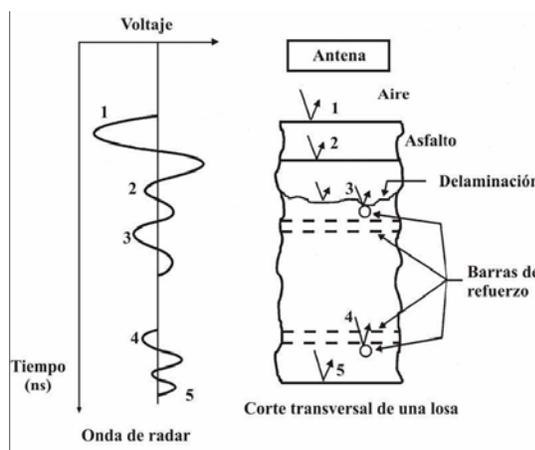
estructurales y estructuras de concreto. El costo de implementación de esta técnica es relativamente elevado y el análisis e interpretación de datos son complejos cuanto más grande es la estructura.

### 1.1.2. Radar de Penetración

El radar de penetración se utiliza como una herramienta de evaluación no destructiva de la sanidad de concreto de puentes; su potencial radica en la detección de daño oculto, como lo es el daño por corrosión en puentes y carreteras y el diagnóstico de la condición interna del concreto.

El principio de operación del radar de penetración (GPR), (ilustración 1) consiste en emitir una onda electromagnética, en un ancho de banda de 500 MHz a 6 GHz desde una antena colocada en la superficie de interés. Las ondas electromagnéticas se reflejan y transmiten en las diferentes interfaces de la losa de concreto debido a las variaciones en las propiedades dieléctricas de los diferentes materiales, y que influyen en la atenuación y dispersión de dichas ondas. Las ondas reflejadas se miden con una antena receptora y el diagnóstico se realiza mediante la interpretación con base en la amplitud y polaridad de las mismas, que dependen de la relación de las constantes dieléctricas de los materiales por los que pasan y que se define como el coeficiente de reflexión.

**Ilustración 1. Principio de operación del Radar de Penetración**



Fuente: CARRIÓN, Francisco. La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes

A partir del principio teórico del radar de penetración se han desarrollado varias metodologías, entre ellas dos muy utilizadas: la metodología Hermes y la metodología Peres. La metodología Hermes utiliza un radar de penetración que contiene 64 antenas en canales independientes de registro y medición, a partir de los cuales se procesa una imagen simple en 2 o 3 dimensiones. Para formar la imagen del interior de la losa, los datos sincronizados se alimentan a un programa de modelación que resuelve el problema. Las imágenes resultantes son referidas como reconstrucciones semejantes a las obtenidas con técnicas de resonancia magnética, o la tomografía computarizada. La metodología Peres se ha enfocado en inspecciones sobre losas prefabricadas; sólo se ha probado a nivel de laboratorio simulando los defectos en las losas de concreto y con variación manual de los parámetros como altura de la antena, frecuencia del pulso, intervalo de muestreo y filtros para evaluar el impacto de cada uno de ellos.

### **1.1.3. Radiografías**

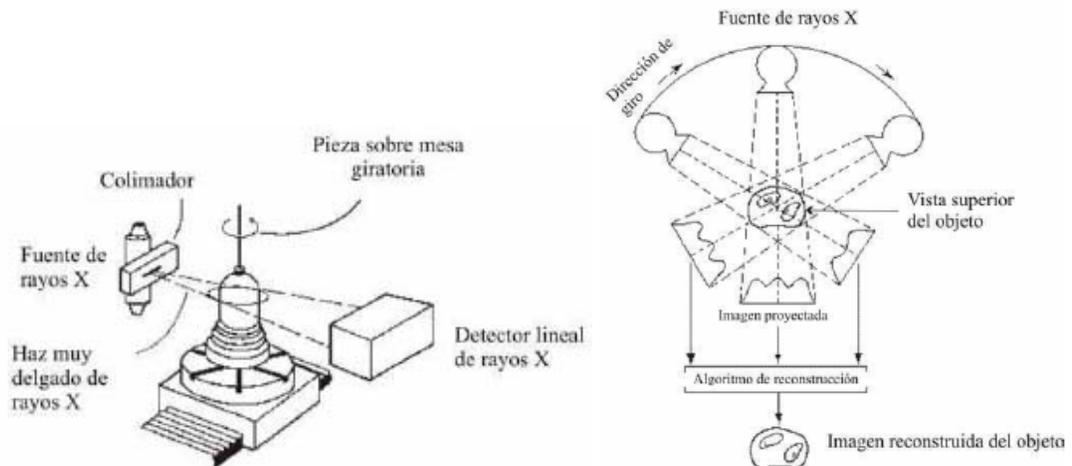
El principio de la radiografía se basa en el grado de absorción de la radiación (típicamente rayos X o rayos gama) que pasa a través de un material de densidad variable. Las dos técnicas experimentales más empleadas son la *radiografía* y la *radiometría*. En la *radiografía*, la radiación de salida es detectada con una emulsión fotográfica y las variaciones en la densidad de la película expuesta reflejan la estructura interna del material que se está inspeccionando. En la *radiometría*, las variaciones en la intensidad gama son detectadas por detectores de radiación, tales como el contador Geiger.

La mayor aplicación de la radiografía gama es la detección de huecos en los ductos de las estructuras de concreto postensado; se ha demostrado que puede detectar huecos desde 5 mm de diámetro en adelante y esto ha sugerido que la radiografía es útil para localizar y determinar la amplitud de las cavidades en el concreto, la detección de huecos en ductos mal inyectados y tendones o cables que están rotos o fuera de posición. El procedimiento es caro debido al tiempo consumido por cada radiografía. Por otra parte, el uso de la radiografía puede generar fuerte oposición del público en general, por el uso de fuentes radioactivas; además de requerir normas y procedimientos de seguridad muy estrictos (Carrión, Hernández y Acosta, 1999)

Otra técnica de inspección por radiografía es la *Tomografía computarizada*, una técnica especializada para obtener imágenes de secciones transversales del interior de una pieza sólida, proporcionando información tridimensional, con lo que se tiene una visión completa del objeto (Carrión et al, 2003).

Un sistema de tomografía computarizada se compone de una fuente de radiación colimada con haz en forma de abanico, un detector que mide la atenuación del haz, un manipulador de precisión que hace girar el objeto con respecto a la fuente y un algoritmo de reconstrucción para producir una imagen en dos dimensiones del corte transversal del objeto. El cálculo de reconstrucción requiere un sistema de cómputo, algoritmos de reconstrucción que usan técnicas de transformación basadas en el teorema de Radon y ejecución de un proceso iterativo. La ilustración 2 muestra un esquema del proceso de una tomografía computarizada.

**Ilustración 2. Representación esquemática de una Tomografía Computarizada**



Fuente: CARRIÓN, Francisco. La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes

#### 1.1.4. Monitoreo de vibraciones

Existen Diferentes agentes del medio ambiente, tanto naturales (lluvia, viento) como los producidos por el hombre (paso peatonal, vehicular, etc.), que generan vibración sobre las

estructuras denominada Vibración ambiental. Con el estudio del efecto de la vibración ambiental sobre una estructura es posible saber si está dañada.

El *Método de Vibración Ambiental* usa *Acelerómetros* los cuales obtienen registros de aceleración en el tiempo, las vibraciones pueden ser graficadas en un equipo de cómputo y posteriormente hacer un análisis matemático de las gráficas permitiendo conocer el comportamiento de un puente, Las mediciones se realizan a lo largo de la vida útil del puente y sin interrumpir su funcionamiento. Cuando se presentan sismos, el *Método de Vibración Ambiental* permite conocer el grado de daño que pudo haber sufrido la estructura a través de la comparación del comportamiento de la estructura antes y después del evento, permitiendo determinar si se necesita alguna reparación o si debe ser demolida (Echeverría y Ochoa, 2006).

La Técnica de Excitación Natural (NExT) permite la estimación de parámetros para determinar la salud de una estructura cuando no es posible medir la fuente de excitación, la efectividad de esta técnica ha sido demostrada a través de la identificación de los parámetros modales de diferentes tipos de estructuras civiles usando el ruido ambiental como excitación.

La *Prueba de vibración por Impacto* permite determinar la solidez de los cimientos de una estructura, específicamente de puentes, usando como indicador la frecuencia natural de las columnas. Debido a que uno de los cambios típicos en el estado de los cimientos es el decrecimiento en profundidad de las zapatas causadas por el progreso de desgaste, la capacidad de carga disminuye y por ende toda la frecuencia natural de la columna tiende a disminuir (Nishimura y Haya, 1997).

#### **1.1.5. Sensores Ópticos**

Los sensores ópticos son instrumentos sensibles a un tipo de luz capaces de medir las variaciones que ésta sufre debidas a fenómenos de interferencia, difracción, absorción y reflexión cuando atraviesa un medio. Se destacan por proveer gran sensibilidad a

pequeños cambios, altas resoluciones de medida y poca absorción de energía del medio. Con el avance de la óptica láser ha sido posible el desarrollo de sensores aplicables al monitoreo de estructuras, despertando gran interés las técnicas basadas en transductores de fibra óptica. Debido a su pequeño tamaño y peso, la fibra óptica puede ser instalada en el interior de las estructuras para obtener información que hasta el momento era inaccesible, y por la compatibilidad con los materiales de construcción se garantiza una alta esperanza de vida del transductor. También se destacan los sensores de medida de distancia basados en el fenómeno de Efecto Doppler.

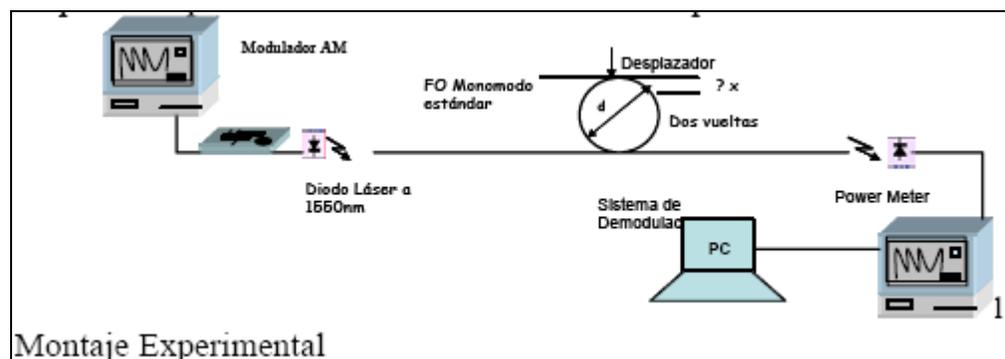
Dentro de los múltiples sensores en fibra óptica desarrollados, los más adecuados para la instalación en estructuras civiles son los que emplean redes de difracción de periodo corto porque permiten la multiplexación de varias redes en el mismo canal de una fibra, lo que se traduce en disminución de costos y complejidad de cableado, y son sensibles a deformaciones mecánicas y cambios de temperatura permitiendo medir estos dos parámetros simultáneamente (Jáuregui et al, s.f.). En este contexto se encuentran los sensores basados en rejillas de Bragg, las cuales tienen la capacidad de autoreferenciarse y multicanalizarse a lo largo de la fibra óptica, lo que las hace atractivas para el desarrollo e implementación de muchos sistemas prácticos para el monitoreo de grandes estructuras y de objetos con acceso difícil para su inspección.

El método más avanzado para el monitoreo de deformación en estructuras basado en rejillas de Bragg se conoce como "*Detección de esfuerzos de umbral mediante rejillas de Bragg*" (Márquez et al, 2003), que consiste en la aplicación de una señal óptica por una o dos fibras (una solidaria y otra de referencia) y su detección mediante interferometría. El principio de operación más común basado en rejillas de Bragg, es el monitoreo de la señal que ésta refleja ante cambios en la variable de observación. Para implementar el sistema basado en sensores distribuidos por rejillas de Bragg se requiere fijar una fibra óptica con las rejillas a la estructura (actualmente las estructuras se construyen con estas fibras). La fuente de luz opera a una longitud de onda fija, fuera de la banda de las rejillas de Bragg, por lo que en condiciones normales la reflectividad de la fibra es baja. Cuando se produce un exceso de esfuerzo en algún punto de la estructura monitoreada, se modifica la longitud del segmento de la fibra y se corre el espectro de reflexión, por lo que se varía el

haz incidente en el fotodetector y por ende su corriente. Esta técnica depende de la intensidad y estabilidad de la fuente de luz.

Aprovechando una de las desventajas de las tecnologías de fibra óptica, las pérdidas de potencia por curvatura, se han desarrollado sensores de fibra óptica centrados en la medida de tensiones mecánicas, presión hidrostática, vibraciones y su impacto en estructuras civiles, aeroespaciales y aeronáuticas; experimentalmente, en la Universidad Nacional de Colombia se está desarrollando un “*Sensor de fibra óptica para medición de pequeños desplazamientos basado en pérdidas por curvatura*” (Acuña, Causado y Torres, 2006).

**Ilustración 3. Montaje experimental para medida de desplazamiento basado en pérdidas por curvatura**



Fuente: ACUÑA, Rodrigo. Sensor de fibra óptica para medición de pequeños desplazamientos basado en pérdidas por curvatura.

Se propone un modelo experimental para una estructura sensora compuesta por anillos de fibra óptica mono modo, el principio del sensor se basa en la pérdida continua de radiación evanescente en el lado externo de la región curvada de la fibra, se encontró que hay una dependencia entre las pérdidas de todo el sistema óptico en función de pequeños desplazamientos inducidos esquemáticamente (Ver modelo experimental, ilustración 3). La sensibilidad del sistema depende de la región de aplicación del sensor, las pérdidas iniciales de potencia, del diámetro y número de los anillos (“a mayor número de anillos mayor sensibilidad al desplazamiento, a costo de una mayor pérdida de potencia inicial). Todo ello hace que se deba determinar experimentalmente las condiciones de

funcionamiento del sistema sensor, considerando además los niveles de ruido del sistema sensor, con lo cual se puede alcanzar una sensibilidad del orden de las décimas de micra”.

Todos los avances en sensores de fibra óptica, apuntan a que, para ser usados en las estructuras éstos deben insertarse dentro de ella a la hora de su construcción, lo cual hace que los avances obtenidos en los últimos tiempos sean útiles en su mayoría en estructuras nuevas, las cuales se denominan estructuras inteligentes (ver sección 1.2), sin embargo para las estructuras ya existentes se debe recurrir a los métodos de inspección no destructiva para monitorearlas durante su vida útil, y cuando sea necesario reemplazarla.

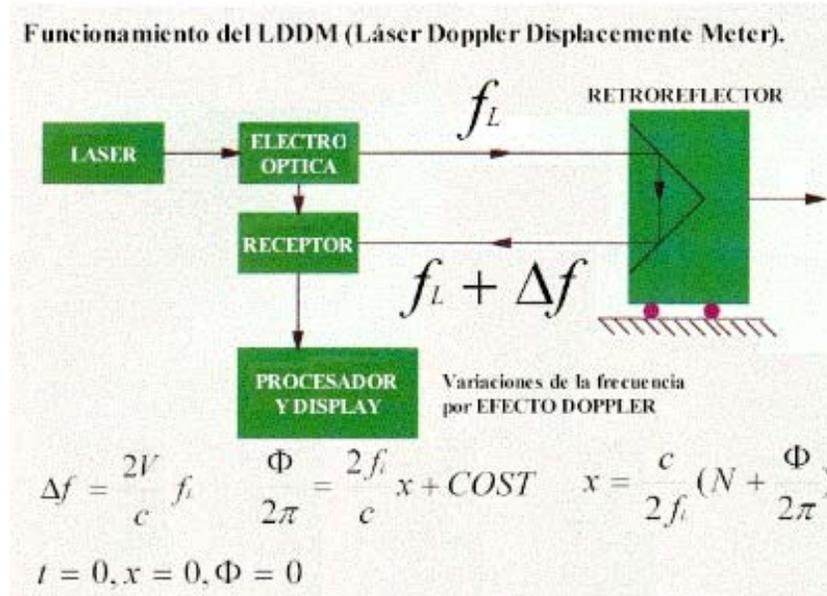
Continuando con los sensores Láser se han desarrollado sistemas de medición de desplazamiento haciendo uso del efecto doppler denominado LDDM (Láser Doppler Displacement meter – Medidor Láser de Desplazamiento por Efecto Doppler), este consiste en una fuente de luz láser modulada (Transmisor), el cual envía un haz láser a un espejo en movimiento, alineado 90° con otro espejo el cual reenvía el rayo reflejado en forma paralela al emitido hasta el receptor. La relación matemática que describe el desfase del haz láser determina el desplazamiento y la velocidad del elemento reflectante en virtud del efecto Doppler, debido a que la frecuencia del rayo reflejado es diferente a la del rayo incidente (Ver ilustración 4) (Electrorava Ibérica a y b)

Este sistema se encuentra patentado por el Dr. Charles Wang, presidente de Optodyne Inc., empresa americana de Compton California, lo que hace restringida la información respecto a este sistema (Wang, 1998). En el mercado existen equipos generados por esta empresa para la medición de vibraciones y desplazamiento de equipos industriales que se encuentran en un entorno controlado, pero está latente la posibilidad de ampliar el campo de aplicación.

Los sensores ópticos han sido probados en laboratorio, bajo condiciones especiales las cuales aún distan de las condiciones que se presentan en ambientes reales, especialmente los sensores láser que requieren condiciones específicas de funcionamiento y que en ambientes naturales difícilmente se pueden obtener algunas de las condiciones, pero es imposible reunir las todas a la vez. Aún se deben y se están

desarrollando estudios para ver la viabilidad de llevar estos sensores a ambientes reales debido a que es difícil asegurar su éxito.

**Ilustración 4. Esquema de funcionamiento LDDM**



Fuente: Elettrovava Ibérica S.L. Funcionamiento de una regla óptica láser basada en la tecnología LDDM. 1998 (<http://www.elettrovava.es/imagenes/docum/laser/func.gif>)

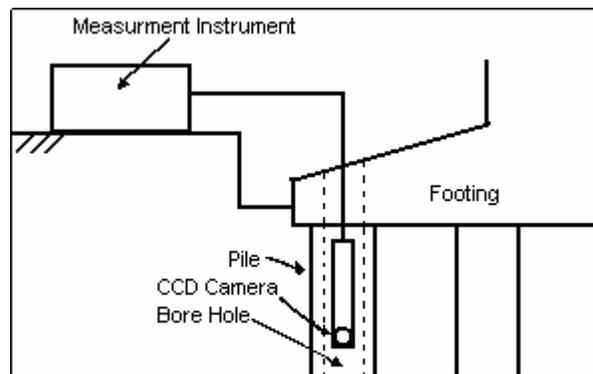
### 1.1.6. Sensores de Imagen - Visión Artificial

La visión artificial también conocida como proceso de imágenes y, más recientemente en aplicaciones de la robótica como visión por máquina, es una técnica basada en la adquisición de imágenes para luego procesarlas digitalmente. La visión artificial se usa en aplicaciones industriales para la automatización de procesos de inspección y clasificación de piezas y productos o para controlar máquinas, especialmente robots con realimentación visual (Angulo e Iñigo, 1986)

En un principio los sensores de imagen utilizados en la inspección de estructuras civiles eran básicamente equipos de fotografía o video que se utilizan para documentar una inspección y tener evidencia que pudiera ser necesaria en un análisis posterior; esas imágenes son digitalizadas y se procesan para aumentar o mejorar su resolución,

detallando aspectos no identificados durante el trabajo inicial de campo (Carrión et al, 2003). Este método es demorado y representa un trabajo agregado para la persona que lo debe ejecutar, y sólo permite una inspección del área exterior de la estructura, no permite evidenciar daños internos. Para solucionar parcialmente este problema existe un sensor de imagen que permite supervisar grietas en columnas llamado *Cámara de Huecos Taladrados* (Ishida, Akita y Watanabe, 1997). Este permite visualizar las fracturas internas en una estructura al ser introducida en el centro de una perforación de la misma. Este método es el más fiable y seguro para supervisar grietas en columnas pero presenta como inconveniente la posibilidad que al realizar la perforación para introducir la cámara las grietas se dañen mostrándolas de mayor tamaño; esto sucede cuando no se tienen planos de los cimientos para definir el punto de excavación y supervisar las columnas profundamente. Para aumentar la eficiencia de este método se puede utilizar en conjunto con otros (como los métodos de ultrasonido, específicamente los de Emisión Acústica) para definir los parámetros de excavación y evitar daños en las grietas. En la ilustración 5 se muestra un esquema de aplicación de la cámara de huecos taladrados.

**Ilustración 5. Esquema Cámara de Huecos Taladrados**



Summary of Bore Hole Camera

Fuente: ISHIDA, Masahiro. Development of survey Method for bridge Foundations. Tsukuba, Japón.

Al igual que los sensores ópticos, los sensores basados en Visión requieren características de iluminación constante para evitar cambios en los parámetros de procesamiento, sin embargo es posible sortear estas dificultades haciendo procesamiento a alta resolución y a alta velocidad de captura, para lo cual se requiere que la capacidad

del sistema de cómputo sea alta para obtener resultados en tiempo real, esto se puede lograr con los DSP (Digital Signal Processor – Procesadores de señales digitales).

## **1.2. ESTRUCTURAS INTELIGENTES**

Las fallas en estructuras son factibles de superar con la utilización del criterio de diseño con tolerancia al daño y la aplicación adecuada de la evaluación no destructiva, lo que conlleva al alargamiento de la vida de servicio de las estructuras. Para usar este criterio se necesita desarrollar nuevos materiales ligeros, con mayor resistencia y la posibilidad de cambiar parámetros como la forma o las propiedades mecánicas y eléctricas. Estos nuevos materiales deben ser “inteligentes”, capaces de responder ante estímulos externos adaptando sus características a las demandas del entorno, por tanto, es necesario el desarrollo de nuevos sensores y actuadores que permitan responder de forma adecuada a estos cambios. Las estructuras desarrolladas y construidas bajo los parámetros y con materiales inteligentes se han denominado *Estructuras Inteligentes* (Fundación OPTI y Fundación INASMET, 2003).

Las estructuras inteligentes se han centrado en los sensores de fibra óptica por sus ventajas frente a otro tipo de sensores como los eléctricos. El potencial de la fibra óptica para ser embebida en los materiales se ha utilizado durante la fabricación de materiales compuestos utilizados habitualmente en las plataformas aeroespaciales y que posteriormente han sido llevados a estructuras civiles. El material puede monitorearse en tiempo real durante el proceso de curado mediante la medida de la atenuación en la fibra debida a microcurvaturas; basado en esto se han construido sistemas semejantes que permiten conocer la fatiga del material y, por tanto, el estado de salud de una estructura durante su vida útil. También se utilizan sensores de fibra óptica basados en redes de Bragg y embebidos en la estructura para sustituir las bandas extensiométricas utilizadas para medir las tensiones y deformaciones soportadas por una estructura (Acuña, Causado y Torres, 2006).

En la actualidad ya existen algunas estructuras construidas con sensores internamente para monitorearla durante su vida útil, es el caso de un puente en el estado de Virginia Oeste que contiene sensores para poder comunicar los puntos de estrés en la estructura, y así permitir reunir datos técnicos que podrían ayudar a los ingenieros a diseñar mejores puentes en el futuro. En la Universidad de Missouri-Rolla (UMR) se encuentra un puente inteligente prototipo en el que se demuestra el uso de compuestos de *polímetro reforzado de fibra (FRP - fiber reinforced polymer)* para aplicaciones civiles y a su vez es un laboratorio de campo para el curso *sensores y materiales inteligentes* de la UMR. Los sensores de temperatura y esfuerzo de fibra óptica están incorporados en la estructura y son monitoreados por una línea de datos de fibra conectada al laboratorio de óptica aplicada. El puente fue sometido a estudios analíticos (por ejemplo modelado de elementos finitos) y pruebas de tráfico peatonal y carga vehicular (Watkins, 2001).

Los estudios están encaminados al desarrollo de materiales con capacidad de monitorización, el objetivo es que en un futuro cercano se construyan estructuras con materiales con funciones de auto-diagnóstico y auto-reparación, lo que permitirá por ejemplo, el 'curado' de grietas y roturas en estructuras y componentes ubicados en lugares de difícil acceso para su reparación; o la recuperación de propiedades perdidas o modificadas involuntariamente por el uso u otros factores de tal forma que la intervención humana sea mínima (Fundación OPTI y Fundación INASMET, 2003).

La tecnología más desarrollada hasta el momento es la de los agentes químicos embebidos en el material en forma de diminutas nano-porciones de un catalizador, situadas a intervalos de pocos nanómetros entre ellas. Estos "reparadores" diminutos actúan libremente en su propio radio de acción. Cuando encuentran una ruptura molecular, inician una reacción química que la sella deteniendo o disminuyendo el proceso de deterioro de forma significativa, dado el efecto auto-reparador del mismo (Fundación OPTI y Fundación INASMET, 2003).

### 1.3. ESTADO DEL MONITOREO DE PUENTES EN COLOMBIA

En Colombia se usa comúnmente la inspección manual visual hecha por expertos en localización y análisis de fallas. Cabe destacar que este paradigma de monitoreo es poco tendiente al mantenimiento preventivo y a la evaluación continua que permita alargar la vida útil de cualquier estructura.

Salud Estructural es un concepto naciente en los procesos de ingeniería en el País, solo hacia 1983 se empieza la fase inicial del sistema de administración de puentes en Colombia y hacia 1996 se inicia la implementación del Sistema Nacional de Puentes de Colombia (SIPUCOL) conformado por los módulos de Inventario, Inspección principal, inspección especial, inspección rutinaria y capacidad de carga, el cual permite priorizar las obras de mantenimiento y de rehabilitación de puentes (Muñoz et al, 2001). El desarrollo del campo tecnológico en la salud estructural se está realizando a nivel de investigación universitaria, y como tal se aplica a ciertas estructuras de la red vial primaria de Colombia.

Parte del problema de introducción de tecnología de salud estructural radica en la adquisición de equipos electrónicos aptos para medir cada una de las variables de una estructura susceptible a daños. Otra parte radica en las redes de comunicación integral en las cuales converjan todas las medidas hechas a una estructura con el propósito de ser llevadas a un sistema de cómputo capaz de interpretarlas. Por último, se impone la barrera social, en la cual confluyen la conservación de los métodos tradicionales de monitoreo, el escepticismo hacia las tecnologías modernas y/o extranjeras y el sentido de compromiso del público en general en torno al cuidado de los equipos e instrumentos aplicados a una estructura.

La Universidad del Valle lleva la delantera en el desarrollo de sistemas de monitoreo de Salud Estructural de puentes en Colombia, ha tomado como piloto el puente “El Hormiguero” localizado sobre el río Cauca en la vía Cali – Puerto Tejada, el sistema se basa en el estudio de los cambios de frecuencias naturales de la estructura implementando dos técnicas: *Técnica de Excitación Natural* (NExT), la cual recopila las vibraciones propias de la estructura, y se obtienen los parámetros modales del sistema; y el *Algoritmo de Realización de Valores Propios* (ERA), que emplea la matriz Hankel para

identificar los parámetros modales de las estructuras a partir de datos de vibración libre. Con esta matriz evaluada se realiza una descomposición de valores singulares y una condensación de las matrices resultantes para, finalmente, calcular las matrices del espacio de los estados del sistema resultante en tiempo discreto (Marulanda et al, 2001).

Posteriormente, la Universidad del Valle, aplicando la técnica NExT y ERA lleva a cabo el proyecto “Desarrollo analítico y tecnológico para la identificación de daños y su aplicación en un sistema de Monitoreo de Salud Estructural en el viaducto Pereira–Dosquebradas”, El objetivo de este proyecto es formular una metodología global de identificación de daños para ser implementada en un sistema de MSE a distancia y en tiempo real en el Viaducto Pereira – Dosquebradas. Este proyecto es pionero en Colombia y a nivel mundial está entre los primeros en desarrollo tanto teórico como tecnológico (Thomas y Guerrero, s.f.).

En la Universidad de Antioquia se propone una metodología de monitoreo para puentes simplemente apoyados, la cual puede ser implementada en el sistema metro de Medellín que cuenta con una serie de puentes simplemente apoyados, “esta metodología está dividida en cuatro niveles; el primer nivel plantea una óptima localización de sensores usando el concepto de la matriz de información Fisher; para el segundo y tercer nivel se plantea una identificación del sistema estructural con base en excitaciones ambientales y finalmente en el cuarto nivel se presenta un método probabilístico que utiliza el teorema de Bayes para detectar daño estructural.” (Riveros, 2007)

En la Pontificia Universidad Javeriana, el Grupo de Investigación de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil está trabajando en las técnicas de confiabilidad estructural, sistemas de monitoreo e instrumentación y estudios especializados de patología y durabilidad para la evaluación de puentes existentes. Tomaron como puente piloto el puente de “Puerto Salgar”, por el cual circula la mayor cantidad de carga pesada para tener certeza de los efectos de las cargas reales, y del cual se construyó un modelo a escala 1:25 para planear las labores de campo y monitoreo del puente real y posteriormente llevaron a cabo el trabajo de campo (Muñoz et al. 2006).

Para el monitoreo se empleó un esquema electrónico de medidores instalados sobre una red de datos multipunto en configuración maestro/esclavo, empleando la señal de diez (10)

galgas instaladas en los elementos principales del puente, durante un periodo de quince días. A través de este monitoreo se comparó la demanda de carga real generada por el tráfico en los elementos principales del puente con las de diseño, encontrando sobrecargas importantes en algunos elementos del puente que afectan su seguridad y que deben ser objeto de control inmediato (Muñoz et al, 2006).

Como se puede apreciar, el trabajo en el área de Salud estructural en Colombia se está realizando a nivel universitario y como proyectos de investigación tomando como referencia algún puente específico de la red vial nacional, pero hasta ahora no hay un plan específico por parte de INVIAS de adoptar estos sistemas o métodos de salud estructural para que sean aplicados a nivel nacional.

En Colombia existen aproximadamente 2100 puentes a lo largo de la red vial nacional, de los cuales 245 son metálicos. De acuerdo con el artículo "*Causas del colapso de algunos puentes en Colombia*" (Muñoz, 2001), entre las principales causas de colapso de puentes en Colombia se encuentra la sobrecarga e impacto (5%), la deficiencia estructural y de diseño (10%), y la falta de mantenimiento (2%). Muchas estructuras de la red vial de Colombia no están diseñadas para la capacidad de carga que en realidad deben soportar ya que aproximadamente del 10 al 15% de los vehículos pesados presentan cargas superiores a las permitidas (Muñoz et al, 2004), para contribuir a la solución de este problema, en este proyecto se presenta una nueva propuesta para monitorear el desplazamiento de una estructura en un punto determinado (el punto de mayor deflexión de la misma) debido a cargas vivas, empleando técnicas de visión por computador, lo cual permite obtener información en tiempo real; de esta manera se logra un monitoreo constante de tal forma que se evalúe permanentemente las condiciones de carga de la estructura, con intención de realizar un mantenimiento preventivo.

## **2. DISEÑO DEL ALGORITMO DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES PARA MEDIR DESPLAZAMIENTOS**

### **2.1. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS**

Las estructuras civiles son sistemas mecánicos que experimentan pequeñas deformaciones cuando son sometidas a fuerzas externas. Estas fuerzas externas, denominadas cargas vivas, pueden ser generadas por el tráfico de personas o vehículos, por contención de masa o por agentes atmosféricos como el viento, los movimientos telúricos y la lluvia. Las estructuras están diseñadas para soportar estas deformaciones elásticas dentro de unos estados límites de funcionamiento y su desplazamiento debe ser supervisado para garantizar que no se exceda dicha deformación, porque eso generaría fatiga en la estructura y su inminente deterioro.

En el caso de los puentes, y concretamente en los puentes carreteros, la principal carga es generada por vehículos pesados como camiones y tractocamiones, produciendo que la superestructura se flexione hacia abajo al paso del vehículo y luego intente recuperarse y volver a su estado inicial. Al hacer esto se genera un movimiento ondulatorio muy lento, casi imperceptible para el ojo humano, de mayor magnitud en el centro de la luz del puente. Como el movimiento de la estructura es lento, los sistemas basados en aceleración deben ser extremadamente sensibles y resultan poco prácticos. Tampoco se puede utilizar sensores de tipo mecánico, ya que su acople con la estructura impide mantener un punto de referencia independiente del movimiento de la estructura. Hasta ahora son los sistemas ópticos los más apropiados para dicho monitoreo.

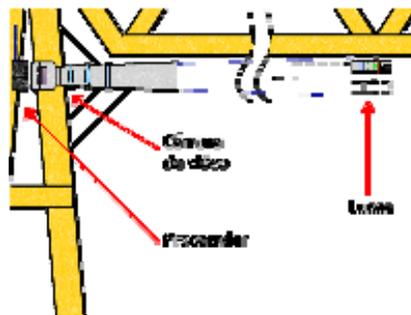
En el campo de la óptica LASER, los sistemas basados en rejillas de Bragg y los sistemas basados en Efecto Doppler, parecen ser los que presentan mejores resultados a la hora de medir deflexiones y deformaciones. Sin embargo, las rejillas de Bragg deben ser construidas en una fibra óptica que se incorpora a la estructura al momento de su construcción, acompañada de equipos electrónicos altamente sofisticados que en la mayoría de las veces, no son asequibles. De la misma manera, los sistemas basados en

LDMM (Medida de Desplazamiento por Efecto Doppler en LASER) requieren complejos mecanismos de calibración y son muy susceptibles al ruido, siendo su implementación solamente posible en laboratorio.

Como contraposición a las soluciones anteriores, en este documento se plantea aplicar el procesamiento de imágenes mediante procesadores de alta velocidad para monitorear el desplazamiento de una estructura en algún punto específico; por ejemplo, en el caso de los puentes, en el centro de cada luz. El campo de la visión artificial ofrece muchas opciones a la hora de desarrollar aplicaciones de inspección, monitoreo y medida. No obstante, los sistemas de visión artificial son, en general, ubicados en espacios cerrados, con ambientes controlados de iluminación y de presencia de objetos en la escena. En el caso que se plantea en este documento, el sistema estará expuesto a condiciones ambientales altamente cambiantes y a la presencia de elementos extraños, desconocidos para el sistema de visión.

Se puede medir el desplazamiento de la estructura si se ubica una cámara de video y se observa con ella el punto de mayor deflexión, al seguir cuadro a cuadro algún punto identificable en la escena. Se puede mejorar el sistema si se acopla un objeto claramente conocido por éste para que se desplace solidariamente con la estructura como parte de ella y sea identificado en la escena. De la misma manera, si se trata de controlar la iluminación con luces artificiales estratégicamente instaladas, se puede evitar la interferencia por la iluminación natural. Se propone en este documento que el objeto externo sea un arreglo de luces, con una geometría especial que brinde información del desplazamiento al sistema de visión artificial, como se muestra en la ilustración 6.

**Ilustración 6. Ejemplo de un sistema de visión artificial para medir deflexiones en puentes**

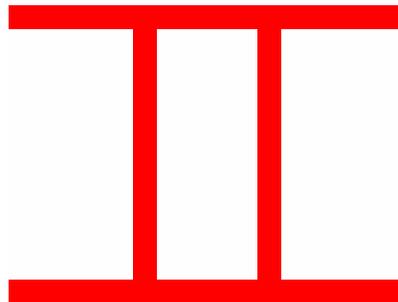


### **2.1.1. Características del objeto a medir**

Al momento de procesar imágenes en un sistema de visión artificial se debe definir previamente las características que diferencian e identifican el objeto a medir, ya sea que éste se presente en forma espontánea o que aparezca en una secuencia de imágenes con cambios en algún parámetro. Si se utiliza un elemento de la estructura como punto de referencia es necesario hacer adaptable el procesamiento para que soporte cambios en los parámetros que identifican el elemento. Si se adhiere a la estructura un elemento previamente conocido por el sistema de visión, cuyos parámetros identificadores permanezcan constantes en el tiempo, se puede diferenciar del fondo de la imagen y transferir las variables y comportamiento de la estructura a la imagen.

Para el diseño del algoritmo se ha escogido adherir al punto de medida un elemento externo plenamente conocido por el sistema. El objeto tiene una figura geométrica simple y bien definida, colores e iluminación controlada suministrada por un juego de luces rojas y dimensiones claramente establecidas adecuadas al rango y resolución de la medida. La figura se muestra en la ilustración 7.

**Ilustración 7. Esquema del objeto solidario formado por una arreglo de luces.**



Esta forma ofrece al sistema de visión la suficiente información para determinar su posición dentro de la imagen y su conversión a unidades físicas. A partir de las intersecciones, esquinas, posición del recuadro que contiene la imagen y el centro de gravedad de la figura se puede determinar la posición de tal figura en la imagen. Por la simetría de la figura, el centro de gravedad se encuentra en el centro del recuadro que la

contiene y se puede hallar en la intersección de las diagonales del rectángulo interno o con el promedio de los puntos de intersección.

A partir de las dimensiones de la figura dadas en píxeles respecto a distancias, longitudes y tamaños de la imagen previamente interpretados como dimensiones físicas se puede calibrar el sistema para traducir la posición del objeto en píxeles a unidades físicas de ingeniería.

Al observar la pendiente de las líneas horizontales y/o verticales se puede determinar el giro de la figura en la imagen en un rango  $(-90^\circ, 90^\circ)$ .

Debido al paralelismo y la figura basada en rectas se puede determinar los fenómenos ópticos de aberración de cojín y aberración de barril debidas a las lentes. Una vez determinado esto se puede iniciar un proceso de reconstrucción de la imagen.

El color rojo ha sido escogido por ser claramente diferenciable del entorno al ser poco común en los objetos y regiones del fondo y porque se puede registrar en un solo plano de la imagen usando una cámara de video a color. Esto simplifica la separación del objeto y el fondo al aplicar un filtro de color sobre la imagen que deje solo los elementos rojos.

### **2.1.2. Parámetros de funcionamiento del algoritmo**

Luego de hacer simulaciones previas por computador usando imágenes de prueba que consideran diversos escenarios se encontró los siguientes parámetros de funcionamiento que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar el algoritmo de procesamiento de imágenes:

El algoritmo debe reconocer el objeto externo descrito en el apartado anterior, medir su desplazamiento en los ejes coordenados X y Y respecto a la escena, y entregar los datos en unidades físicas, por ejemplo milímetros o centímetros.

El algoritmo debe descartar cualquier otro objeto que aparezca en la escena, al igual que el fondo de esta. De la misma manera debe descartar cambios de brillo, sombras o destellos producidos por las condiciones ambientales. Para ello, se debe usar como parámetro diferenciador el color del objeto, el cual, al provenir de una fuente de iluminación directa, es poco cambiante.

El algoritmo debe aprovechar al máximo las capacidades de la cámara, como son: resolución espacial, profundidad de color y velocidad de captura en cuadros por segundo. En este caso, debido a que el movimiento de las estructuras es lento y de mínima amplitud, se prefiere la resolución sobre las otras dos características.

El algoritmo debe considerar los límites de los recursos empleados por el motor de procesamiento y en tal sentido, debe estar diseñado para utilizar el menor tamaño de memoria. No obstante, esta restricción no debe conllevar a mayor carga de procesamiento como en la mayoría de las compresiones de imágenes, porque se limitaría el muestreo en el tiempo y el ancho de banda de los movimientos sensados por el sistema. La restricción de memoria implica que se procesen solo un mínimo de datos extraídos de la imagen, suficientes para identificar y medir el objeto junto con su desplazamiento.

Por último el algoritmo debe garantizar precisión en la medida entregada y la velocidad de respuesta suficiente para monitorear el movimiento con correspondencia entre la razón de cambio de la deformación de la estructura y el ancho de banda de la señal de salida.

## **2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ALGORITMO DE PROCESAMIENTO**

Pensando en las características que se buscan en el sistema, se escogió seguir el paradigma de los algoritmos SRI (llamados así por ser creados en el Stanford Research Institute), porque están enfocados hacia el procesamiento de imágenes binarias, la compresión de datos y el procesamiento en tiempo real.

Para los desarrolladores ha estado claro que es imposible diseñar algoritmos ejecutables en tiempo real para imágenes de carácter general si no se simplificaban drásticamente sus condiciones y características. Las condiciones que debe satisfacer una imagen para poder ser analizada por los algoritmos SRI son:

1. La imagen debe ser binaria
2. Las partes del objeto del reconocimiento no se tocan ni se superponen. En el caso de que dos partes se toquen o se superpongan, se consideran como una sola parte.
3. La imagen es estable; ni se balancea, ni cambia de posición.” (Angulo e Iñigo, 1986)

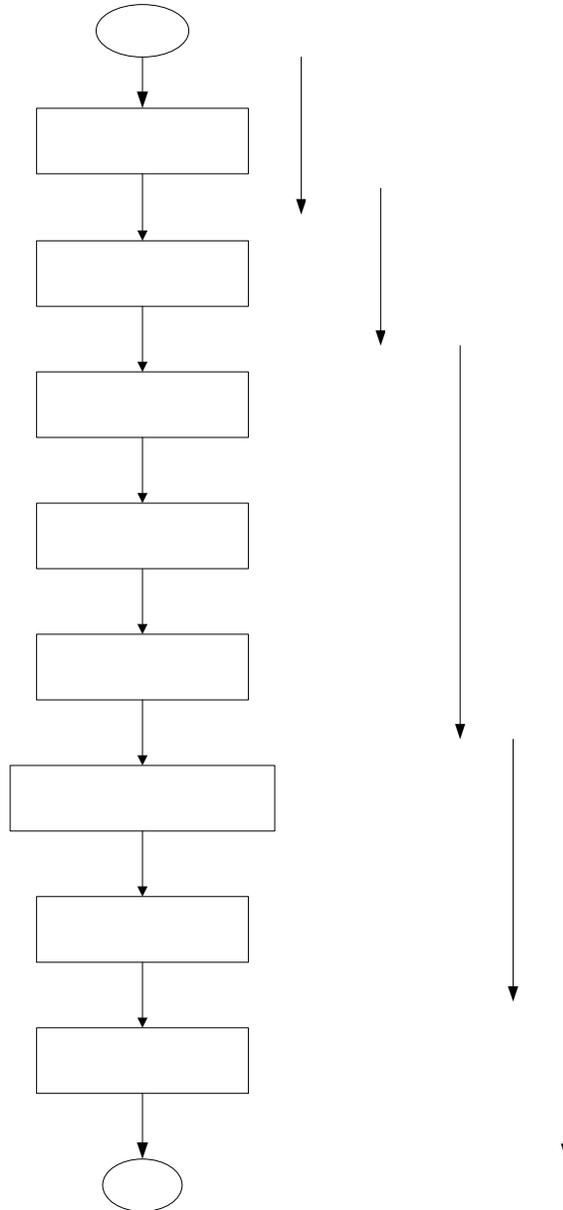
Para cumplir con la primera condición, se ha propuesto transformar la imagen de tres colores: Rojo (R), Verde (G) y Azul (B) en uno solo de escala de grises mediante un conjunto de operaciones aritméticas y acto seguido generar una imagen binaria que represente los objetos que interesan, descartando el fondo. A la imagen segmentada y binaria se le eliminan regiones pequeñas de poco interés y luego se codifica la imagen mediante *longitud de carrera* (RLE: Run Length Encoding, en inglés), para reducir el costo computacional y el tamaño de memoria.

Este código obtenido será etiquetado para conectar regiones pertenecientes a un mismo objeto. El etiquetamiento sirve para agrupar las regiones, reconocer los objetos y medir sus características, acto que permite discriminarlos en la imagen dejando los objetos de interés, por ejemplo, aquellos objetos más grandes que superan el filtrado inicial. De la misma manera, el etiquetamiento permite definir una medida de centroide que es válida como medida de desplazamiento al ser observada cuadro a cuadro, pues se espera que la figura no cambie de forma ni de escala.

Para calibrar el sistema y validar las medidas obtenidas, se aplica la transformada de Hough a una región de interés (ROI: Region of Interest) con intención de detectar las líneas ejes del esquema mostrado en la ilustración 8 del apartado 2.1.1. Estas entregan información suficiente para la interpretación de las medidas.

El algoritmo propuesto, mostrado en la ilustración 8 plantea cinco fases de procesamiento: adquisición, segmentación, acondicionamiento previo, extracción de características e interpretación. Estas fases se llevan a cabo mediante ocho pasos aplicados secuencialmente a la imagen, los cuales se describen en los apartados siguientes.

**Ilustración 8. Diagrama de flujo del algoritmo propuesto para el procesamiento de imágenes**



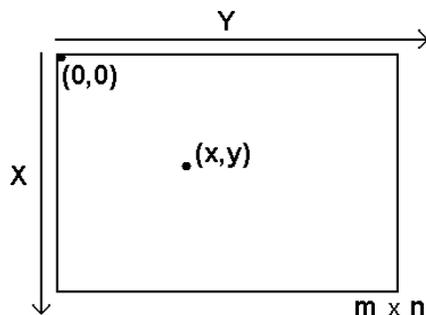
## 2.3. ADQUISICIÓN DE LA IMAGEN

### 2.3.1. Almacenamiento de la imagen en memoria

Cuando las imágenes provienen de una cámara de video digital a color, de alta resolución y con salida en formato RGB sin compresión cada marco o imagen del video es independiente de los anteriores y se registra y almacena a una velocidad constante determinada por las capacidades del sistema de procesamiento. Cada imagen debe ser almacenada previamente en memoria, ya sea ésta, externa si el tamaño de la imagen es muy grande, o interna si lo permite la capacidad del procesador empleado.

Cada píxel de la imagen esta compuesto generalmente de tres bytes (8-bits), uno por color primario, es decir que la profundidad de color es de 24 bits (más de 16 millones de colores posibles). Los píxeles son almacenados como elementos de una matriz de tres dimensiones  $m \times n \times 3$ , donde cada sub-matriz  $m \times n$  contiene un plano de color, siguiendo el modelo RGB y el sistema de coordenadas propuesto en la ilustración 9, conforme al formato entregado por la cámara.

**Ilustración 9. Sistema de coordenadas cartesianas utilizadas referidas a la imagen.**



La primera fila se encuentra en la posición  $x=0$  y la última se encuentra en  $x=n-1$ . Para cada fila, el primer píxel ubicado en la primera columna de la matriz de la imagen se encuentra en la posición  $y=0$  y el último en la posición  $y=m-1$ . Así, el ancho de la imagen es de  $m$  píxeles, mientras el alto es de  $n$  píxeles.

La captura de la imagen en tres planos de color R, G y B, para todo punto (x, y) de la imagen de tamaño m x n se define como tres funciones propias de la imagen del tipo:

$$R(x, y) = f_r(x, y); 0 \leq f_r(x, y) \leq 255; \quad (1)$$

$$G(x, y) = f_g(x, y); 0 \leq f_g(x, y) \leq 255; \quad (2)$$

$$B(x, y) = f_b(x, y); 0 \leq f_b(x, y) \leq 255; \quad (3)$$

### 2.3.2. Filtro de Color

Si se conoce el color característico y este es constante en todo el objeto, el primer paso para diferenciarlo en la imagen es aplicar un filtro que realce ese color y atenúe los demás. Esto permite segmentar una región que contiene al objeto del color deseado.

Muchas aplicaciones usan el modelo de color HSI (tinte, saturación e intensidad, por sus siglas en inglés) para identificar el color de diferentes objetos. Cuando se usa el espacio de color HSI no hay necesidad de conocer el porcentaje de rojo, verde o azul para producir un color. Simplemente ajustando el matiz (Hue) se obtiene el color deseado, para cambiar la profundidad, por ejemplo de rojo a rosado, se ajusta la saturación y para hacerlo más oscuro o claro se ajusta la intensidad (Crane, 1992). Esto evidencia la capacidad del modelo para discriminar un color independiente de las sombras o cambios de iluminación en el objeto siempre y cuando la iluminación no distorsione los colores.

También se puede desarrollar filtros de color basados en el modelo de color RGB, para los cuales se establecen proporciones y relaciones mediante operaciones aritméticas. Un caso particular es el Filtro de Color Programable (PCF) descrito por Batchelor y Whelan (Batchelor y Whelan, 2002). En este se plantea la definición de un triángulo contenido por el cubo que se forma al tomar los valores R, G y B como ejes coordenados. El triángulo es la proyección de un plano sobre el cubo que está definido por dos ecuaciones U y V que llevan los colores RGB mediante una función transformada de tal manera que

cualquier color definido dentro del cubo puede proyectarse en el plano y representa un color específico independiente de la intensidad.

El filtro de extracción de color más simple es aquel que realiza los elementos que contienen solo un color primario, mediante un método similar al PCF. Se parte del modelo RGB para reducir la imagen de tres colores a uno que represente y contenga el objeto a identificar. Para cada uno de los píxeles de la imagen formada por los planos R, G y B en escalas de 0 a 255 niveles, se define la ecuación de sustracción de planos:

$$I(x, y) = 2R(x, y) - G(x, y) - B(x, y); 0 \leq I(x, y) \leq 255 \quad (4)$$

Donde: I es la imagen de salida del filtro

R es el plano rojo de la imagen de entrada

G es el plano verde de la imagen de entrada

B es el plano azul de la imagen de entrada

El resultado de la aplicación del filtro es una imagen en escala de grises cuya intensidad depende de la intensidad y pureza de color primario de interés en cada uno de los objetos, actúa como un filtro pasa altos y tiene como característica el incremento del contraste entre los objetos de color rojo con respecto a los demás objetos y el fondo, lo que permite una mejor umbralización posterior. Sin embargo, este filtro no es un detector de bordes porque no los destaca en la imagen con respecto al objeto mismo.

Como resultado del aumento de contraste, el filtro de color produce un ensanchamiento de la parte central del histograma hacia los extremos inferior y superior del mismo en la escala de grises. El histograma tiene máximos en los valores bajos de la escala (fondo), máximos en la parte superior (objeto) y un acentuado valle en los valores intermedios, sobre el cual se puede fijar un valor de umbral en posteriores etapas de segmentación (Ver ilustración 10).

## 2.4. SEGMENTACIÓN POR UMBRALIZACIÓN

La umbralización es una simple operación de extracción de formas y de segmentación que elimina el fondo y permite identificar y analizar los objetos siempre y cuando estos estén desconectados (Jäne, 2002). La imagen resultante del filtrado en color por la ecuación (4) se puede convertir en una imagen binaria (Seul, O'gorman y Sammon, 2000) (cuantización a dos niveles) a partir de un nivel de umbral previamente establecido. Se define esta operación como:

$$I_b(x, y) = \begin{cases} 1 & I(x, y) \geq T \\ 0 & \text{En otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

La umbralización asume que el objeto o la forma a identificar tiene como característica representante su brillo y a partir de este fija el valor del umbral (Nixon y Aguado, 2002). En esta aplicación dicho análisis se lleva a cabo basado en el histograma de la imagen I de la ecuación (4).

Si  $s$  es una función de conteo de píxeles por nivel:

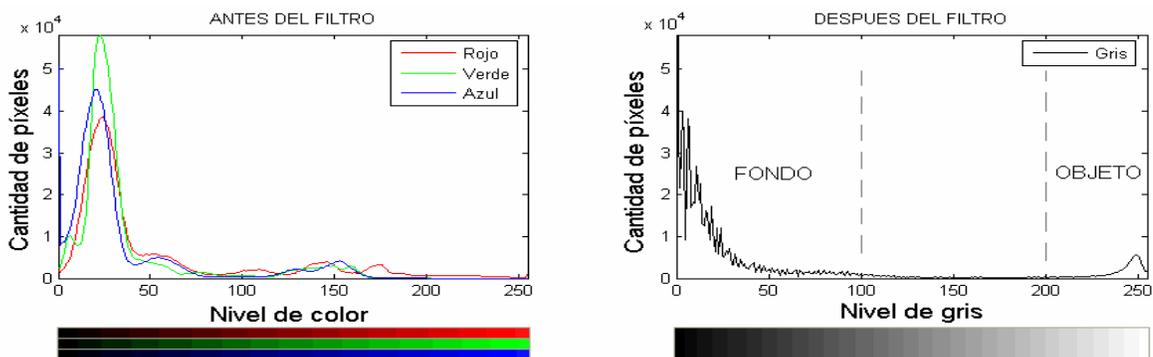
$$s(i, x, y) = \begin{cases} 1 & I(x, y) = i \\ 0 & \text{En otro caso} \end{cases} \quad \forall i \in [0, 255] \quad (6)$$

El histograma de la imagen filtrada se define (Batchelor y Whelan, 2002):

$$h(i) = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n s(i, x, y) \quad (7)$$

Donde:  $i$  es el nivel de intensidad de gris

**Ilustración 10. Histograma de la imagen antes y después del filtro de color**



En el histograma se observa una región de valle hacia el centro de la escala entre dos picos en el extremo más oscuro (fondo) y en el extremo más claro (objeto). Esta región de valle se encuentra generalmente entre los niveles mínimo y máximo. El umbral T se fija de acuerdo al histograma de la imagen después del proceso de filtrado de color y como se puede observar se tiene un amplio rango para determinarlo. Se ha optado por elegir como umbral el mayor nivel de intensidad en el valle donde se encuentre un mínimo, tal como se muestra en las ecuaciones (8) y (9):

$$h_{\min} = \min\{h\} \quad (8)$$

$$T = \max\left(i \mid h(i) = h_{\min}\right) \quad (9)$$

La umbralización al igual que el filtro de color es una operación lógica local, por lo que se puede aplicar al momento de almacenar la imagen de entrada, sin embargo, cuando se requiere el histograma para definir el umbral, la segmentación se aplica después de almacenada la imagen. Ya que el resultado solo puede tomar dos valores, cada píxel se puede almacenar en un bit de memoria y por lo tanto en esta etapa hay una considerable reducción de memoria. No obstante, dicha reducción no se aplica al tiempo de procesamiento en las etapas posteriores.

## 2.5. FILTRO MORFOLÓGICO.

Los elementos pequeños de la imagen que constituyen ruido se pueden eliminar mediante una serie de erosiones sucesivas, las cuales adelgazan las regiones blancas (formadas por '1' lógicos) y que luego, si no desaparecen, se pueden volver a un tamaño aproximadamente igual al original mediante un número igual de dilataciones sucesivas. Las dilataciones producen la eliminación de pequeños huecos dentro de las regiones así como el suavizado de los bordes.

Las operaciones de erosión y dilatación están definidas a partir de los operadores de Minkowski como operaciones que tienen en cuenta cada píxel y sus vecinos, cuya relación esta definida por un elemento estructurante (Batchelor y Whelan, 2002). El elemento estructurante define cuales vecinos deben ser '1' para obtener un resultado. El más común es el que se define en la ecuación (10).

$$v(x, y) = \begin{bmatrix} I_b(x-1, y-1) & I_b(x-1, y) & I_b(x-1, y+1) \\ I_b(x, y-1) & I_b(x, y) & I_b(x, y+1) \\ I_b(x+1, y-1) & I_b(x+1, y) & I_b(x+1, y+1) \end{bmatrix} \quad (10)$$

### 2.5.1. Erosión de objetos

La erosión es una operación lógica AND sobre los elementos de la vecindad  $v$  (Pratt, 2001). Si todos los elementos de la vecindad son '1' entonces el píxel toma el valor '1'. En caso contrario el píxel toma el valor '0'. Al aplicar el elemento estructurante definido por la ecuación 10 a la imagen resultante en la ecuación (5) se obtiene:

$$I_e(x, y) = \wedge v(x, y) \quad (11)$$

El resultado de aplicar este operador a la imagen es un adelgazamiento de los objetos debido a la pérdida de elementos de los bordes (Young, Gerbrands y Van, 1998). Así, si un objeto es un cuadrado de 3 x 3 píxeles, se reduce a solo un píxel y si es de menor tamaño desaparece. De la misma manera desaparecen las líneas que tienen menos de 3 píxeles de grosor. Al aplicar la erosión sucesivamente sobre la imagen produce que los objetos de unos pocos píxeles desaparezcan de la imagen. No obstante, no se recomienda aplicar este operador muchas veces porque deforma y desconecta el objeto a medir y porque se incrementa el costo computacional.

### 2.5.2. Dilatación de objetos

Luego de aplicar la erosión a la imagen, es conveniente regresarla a su tamaño original mediante dilataciones sucesivas, en el mismo número de erosiones que se haya aplicado

anteriormente. La dilatación aplicada a la imagen resultante en la ecuación 11 es una operación lógica OR sobre la vecindad  $v$  y tiende a conectar regiones cercanas y rellenar huecos (Pratt, 2001). En este caso, si alguno de los elementos de la vecindad es '1' entonces el píxel toma el valor '1' y solo cuando todos los elementos de la vecindad son '0' el píxel toma valor '0', según se expresa en la ecuación (12).

$$I_d(x, y) = \vee v(x, y) \quad (12)$$

## 2.6. CÓDIGO RLE

El algoritmo propuesto en este documento sigue los postulados de los algoritmos SRI y al igual que ellos se basa en el análisis de conectividad, el cual opera sobre imágenes binarias codificadas en RLE. Una imagen binaria codificada en RLE queda representada por un vector de números que especifican la coordenada horizontal de cada transición de 1 a 0 y de 0 a 1, fila por fila (Angulo e Iñigo, 1986).

### 2.6.1. Codificación RLE

Para hacer práctica la compresión de imágenes, el código RLE está modificado para que indique por cada fila y en cada transición la posición del primer y último píxel que contiene '1' en esa transición y siempre por pares de inicio y fin de la región. Se agrega un cero como marcador de cambio de fila para indicarle al resto del proceso el paso de una fila a otra al leer secuencialmente el código. El algoritmo de codificación hace un barrido de izquierda a derecha y de arriba a abajo a la imagen resultante de la ecuación (12), partiendo desde la primera fila en la parte superior y registrando el inicio y fin de cada zona blanca, de acuerdo al sistema de coordenadas establecido.

$$c(i) = \begin{cases} y & \text{si } (y = 1 \wedge I_d(x, y) = 1) \vee (I_d(x, y - 1) = 0 \wedge I_d(x, y) = 1) \\ y & \text{si } (y = m \wedge I_d(x, y) = 1) \vee (I_d(x, y) = 1 \wedge I_d(x, y + 1) = 0) \\ 0 & \text{si Inicia una nueva línea ó, } (x = n \wedge y = m) \end{cases} \quad (13)$$

Donde:  $c$  es el vector que contiene el código RLE para la imagen  $I_d$ .

$y$  es el valor de la columna para el píxel donde se produce la transición.

$x$  es el valor de la fila.

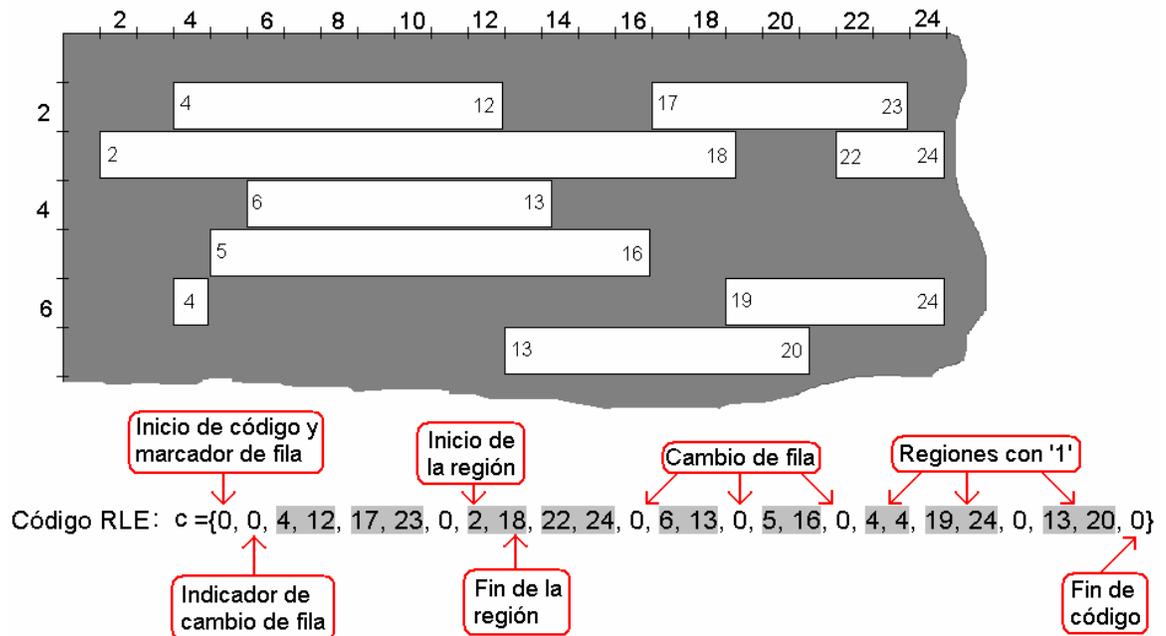
$m$  es el ancho de la imagen.

$n$  es el alto de la imagen.

$i$  es el índice del código que se incrementa cuando encuentra una transición o cambia de fila

La codificación RLE es un método de compresión de imágenes que puede reducir el tamaño de memoria requerida hasta un 1% del tamaño inicial, siempre y cuando las transiciones entre un nivel y otro no sean muy frecuentes línea por línea y la cantidad de niveles de color sea limitada como es el caso de imágenes binarias. Al operar sobre el código RLE y no sobre la imagen se ignoran los píxeles que no representan transición quedando el cálculo sobre estos, implícito en los que se hacen sobre las transiciones que los contienen.

### Ilustración 11. Ejemplo de codificación RLE

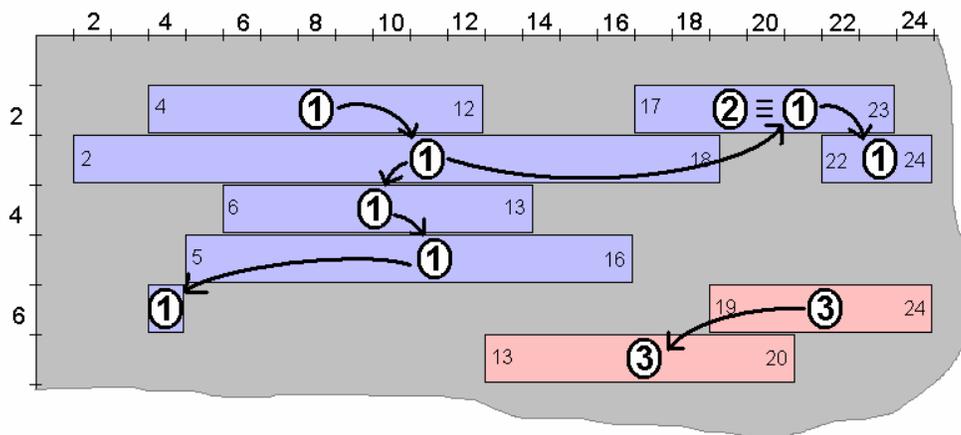


## 2.6.2. Etiquetamiento de la imagen

La conectividad a la que se refiere SRI se puede establecer mediante grafos o utilizando un vector de etiquetamiento, paralelo al código RLE, en el cual se represente todos los segmentos de código pertenecientes a una misma región mediante un único valor de etiqueta. Las etiquetas son números o valores establecidos para identificar que una región o píxel pertenece a un objeto determinado. Este algoritmo detecta líneas contiguas, las cuales, por fuerza, deben pertenecer a una misma región. Sin embargo, diferentes regiones no pertenecen, necesariamente, a diferentes objetos (Di Zenzo, Cinque y Levialdi, 1996).

Para etiquetar la imagen comprimida se crea un vector denominado  $e$ , del mismo tamaño que el código RLE que la representa, de tal manera que, mientras la posición  $i$ -ésima del código representa una transición de una región, la misma posición  $i$ -ésima en el vector de etiquetas representa la pertenencia de la región a un objeto.

Ilustración 12. Ejemplo de etiquetamiento de objetos sobre código RLE



Código RLE:  $c = \{0, 0, 4, 12, 17, 23, 0, 2, 18, 22, 24, 0, 6, 13, 0, 5, 16, 0, 4, 4, 19, 24, 0, 13, 20, 0\}$

Etiquetas:  $e = \{0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 3, 3, 0, 3, 3, 0\}$

Para asignar las etiquetas a cada región perteneciente a un objeto se ha establecido una conectividad con una 8-vecindad al compararla con las regiones de la fila anterior, de la siguiente manera:

- a) Se recorre el código RLE fila por fila marcadas por los ceros (0) y se hace corresponder ese mismo valor al vector de etiquetas, en idéntica posición.
- b) En cada fila y para cada región, se establecen todas las regiones de la fila anterior que tienen píxeles conectados. Esto se logra observando si las regiones en las dos filas se traslapan o se conectan en diagonal.
- c) Si la región de la fila actual no está etiquetada, se copia la etiqueta de la primera región en la fila anterior que tiene conectividad. Sino, se hace equivalente la etiqueta de esta región con cada etiqueta en la fila anterior que guarde conectividad.
- d) Si la región no tiene conectividad con ninguna región en la fila anterior, entonces se asigna una nueva etiqueta. Se repite desde el principio hasta recorrer todo el código RLE.

Este método de etiquetamiento exige una revisión recursiva de las regiones etiquetadas, para hacer corresponder a todas las regiones con etiquetas equivalentes, una sola que las identifique como propias de un mismo objeto. Para revisar el etiquetamiento se establece un vector de mapeo tipo look-up table, donde para cada etiqueta inicial se hace corresponder una etiqueta final y que se actualiza cada vez que se encuentran dos regiones conectadas con etiquetas diferentes. Además, el proceso se repite tantas veces hasta que el número de etiquetas y por ende, de objetos identificados, sea mínimo.

## **2.7. FILTRO DE ÁREA**

### **2.7.1. Medida de área de los objetos etiquetados**

El área de un objeto o región en la imagen es el número de píxeles que la conforman. Para medir el área de cada objeto mediante el código RLE, se acumulan las longitudes de todas las regiones que lo componen. Para ello, se utiliza un acumulador de área para cada objeto y se recorre el código RLE simultáneamente con el vector de etiquetas.

Según el vector de etiquetas, si la región delimitada por los valores  $c(i)$  y  $c(i+1)$  pertenece al objeto  $i$ , entonces se acumula la longitud  $= c(i+1)-c(i)+1$ , al área del objeto, como se muestra en la ecuación (14).

$$area(i) = \sum_{j=1}^L c(j+1) - c(j) + 1 \Big|_{\{c(j), c(j+1)\} \in \text{objeto } i} \quad (14)$$

Donde:  $area(i)$  es la medida de área del objeto  $i$ , indicado por el vector de etiquetas.

$\{c(j), c(j+1)\}$  son, respectivamente, los valores de inicio y fin de una región expresada en el código RLE.

$L$  es la longitud del vector  $c$ .

### 2.7.2. Remover objetos pequeños

Para remover los objetos pequeños, primero es necesario calcular el umbral de área del filtro. Este se obtiene como una fracción de la máxima área calculada en el paso anterior, como se expresa en la ecuación (15).

$$U_a = 0.25 \cdot \max(area) \quad (15)$$

El filtro se establece al comparar el área de cada uno de los objetos etiquetados mediante  $e$  con el umbral  $U_a$ . Se recorre el código RLE  $c$  simultáneamente con el vector de etiquetas  $e$  y se observa cada región; si esta pertenece a un objeto cuya área supera el umbral, entonces esa región se almacena en un nuevo código RLE, sino se descarta. Los marcadores de cambio de fila se mantienen en el nuevo código de manera similar al original, el nuevo código reemplaza al original y se crea un nuevo vector de etiquetas con un solo valor para todas las regiones, indicando que todas ellas pertenecerán a un mismo objeto.

## 2.8. EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS

### 2.8.1. Cálculo del centroide del objeto resultante

Según los planteamientos hechos en la primera parte de este capítulo, el centroide es una medida representativa de la posición del objeto en la imagen y se puede rastrear cuadro a cuadro para obtener el desplazamiento del objeto, y por ende de la estructura. El centroide o centro de gravedad es un punto en la imagen  $(\bar{x}, \bar{y})$  que sirve como descriptor de región basado en los momentos inerciales de primer orden. Dicho punto se obtiene por un par de sumas ponderadas en dirección de los ejes coordenados y tiende a ubicarse en el centro de la región. Su definición formal para un objeto o región R se muestra en las ecuaciones (16) y (17).

$$\bar{x} = \frac{\sum_R x \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{\sum_R \Delta x \cdot \Delta y} \quad (16)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_R y \cdot \Delta x \cdot \Delta y}{\sum_R \Delta x \cdot \Delta y} \quad (17)$$

Donde:  $\bar{x}$  centro de gravedad en el eje coordenado x.

$\bar{y}$  centro de gravedad en el eje coordenado y.

x é y son las posiciones de fila y columna de cada píxel que pertenece a R

R es la región que contiene los píxeles de un objeto determinado

$\Delta x$  es la distancia entre píxeles en el eje x. Normalmente  $\Delta x = 1$ .

$\Delta y$  es la distancia entre píxeles en el eje y. Normalmente  $\Delta y = 1$ .

Se puede calcular el centro de masa a partir del código RLE. Nótese que en las ecuaciones (16) y (17), el denominador es la medida de área del objeto (Angulo e Iñigo, 1986). Así, el centroide se obtiene mediante la expresión.

$$\bar{x} = \frac{\sum_R x}{AREA} \quad (18)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_R \sum_{y=c(j)}^{c(j+1)} y}{AREA} \quad (19)$$

Donde: x es la posición de la fila que contiene alguna región de R en el código RLE. Se obtiene por incremento cada vez que se encuentre un marcador de cambio de fila  $c(j)=0$ .

$\{c(j),c(j+1)\}$  son, respectivamente, los valores de inicio y fin de una región expresada en el código RLE.

AREA es la sumatoria de todos los píxeles de la región, según la ecuación 14.

### 2.8.2. Extracción de una subimagen o región de interés ROI

La creación de una subimagen o ROI (Región De Interés, por sus siglas en inglés) consiste en la identificación de una región determinada por el mínimo rectángulo que contenga todos los píxeles del objeto. Este rectángulo se obtiene al encontrar el píxel del objeto más distante verticalmente hacia arriba (mínima fila,  $x_{\min}$ ), el píxel más distante verticalmente hacia abajo (máxima fila,  $x_{\max}$ ), el más distante horizontalmente hacia la izquierda (mínima columna,  $y_{\min}$ ) y el más distante horizontalmente hacia la derecha (máxima columna,  $y_{\max}$ ) como se expresa en las ecuaciones (20), (21), (22) y (23).

$$x_{\min} = \min \left( x \mid I(x, y) = 1 \right) \quad (20)$$

$$x_{\max} = \max \left( x \mid I(x, y) = 1 \right) \quad (21)$$

$$y_{\min} = \min \left( y \mid I(x, y) = 1 \right) \quad (22)$$

$$y_{\max} = \max \left( y \mid I(x, y) = 1 \right) \quad (23)$$

$$h = x_{\max} - x_{\min} \quad (24)$$

$$w = y_{\max} - y_{\min} \quad (25)$$

Donde:  $x_{\min}$  es la menor fila que contiene '1' (píxel más distante hacia arriba)

$x_{\max}$  es la mayor fila que contiene '1' (píxel más distante hacia abajo)

$y_{\min}$  es la menor columna que contiene '1' (píxel más distante hacia la izquierda)

$y_{\max}$  es la mayor columna que contiene '1' (píxel más distante hacia la derecha)

$h$  es la altura de ROI

$w$  es el ancho de ROI

Para ello se recorre el código  $c$  desde la primera posición con las siguientes consideraciones:

- a) Se genera un contador de filas  $x$  que inicia en 0.
- b) Se inicia las variables  $x_{\min}=0$ ,  $x_{\max}=0$ ,  $y_{\min}=m$ ,  $y_{\max}=0$ .  $m$  es el ancho de la imagen.
- c) Al encontrar un marcador de cambio de fila ( $c(j)=0$ ) se incrementa  $x$ .
- d) Al encontrar la primera región se asigna  $x_{\min}=x$ .
- e) Cada vez que se encuentra una nueva región se asigna  $x_{\max}=x$ .
- f) Al encontrar una nueva región, si el inicio de esta es menor que  $y_{\min}$ , entonces  $y_{\min}$  toma dicho valor de inicio, si no permanece igual.
- g) Al encontrar una nueva región, si el final de esta es mayor que  $y_{\max}$ , entonces  $y_{\max}$  toma dicho valor de final, si no permanece igual.

Debido a las características geométricas del objeto a medir, la simetría con los ejes coordenados y la composición de segmentos de rectas horizontales y verticales (como se observa en la ilustración 7, sección 2.1.1), se puede adoptar el rectángulo de ROI como un identificador propio del objeto, siempre y cuando no se presenten aberraciones en la captura de imágenes. Por ello, también se puede asumir que el centro del rectángulo

$(\bar{x}_{ROI}, \bar{y}_{ROI})$  coincide con el centroide del objeto en al menos una vecindad. El centro de ROI se obtiene como:

$$\bar{x}_{ROI} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} = x_{\min} + \frac{h}{2} \quad (26)$$

$$\bar{y}_{ROI} = \frac{y_{\min} + y_{\max}}{2} = y_{\min} + \frac{w}{2} \quad (27)$$

La definición de la ROI permite reducir los costos computacionales porque restringe los cálculos a un área más pequeña sin perder el sistema de coordenadas en operaciones que dependen de este como es el caso de la transformada de Hough.

## 2.9. EXTRACCIÓN DE LÍNEAS EJE POR TRANSFORMADA DE HOUGH

La transformada de Hough es una técnica que localiza formas geométricas en una imagen binaria. Se usa para extraer líneas, en cuyo caso la definición matemática es equivalente a la transformada de Radon. Es una técnica usada en la búsqueda de patrones pero con la ventaja de ser más rápida, debido a una reformulación del proceso, el cual se basa en un arreglo de acumuladores de “evidencia” o votos de los píxeles que cumplen una propiedad geométrica. La transformada de Hough define un mapeo de los puntos de la imagen en un espacio acumulador (Nixon y Aguado, 2002).

Como se describió en el apartado 2.1., la figura está definida por cuatro segmentos de línea, dos horizontales y paralelos y dos verticales que los interceptan formando ángulo recto. Al aplicar la transformada de Hough para líneas se puede determinar la ecuación de los ejes a estos segmentos.

$$\rho = x \cos(\theta) + y \sin(\theta) \quad (28)$$

Donde:  $\theta$  es el ángulo que forma la normal de la línea de la imagen con el eje x.

$\rho$  es la longitud de la normal desde el origen de ROI hasta la línea.

### 2.9.1. Erosión por intermedio del código RLE

Antes de aplicar la transformada de Hough a la imagen conviene adelgazar el objeto mediante múltiples erosiones sucesivas para hacer más evidentes los ejes, reducir los costos computacionales y el número de líneas resultantes, acción que reduce el riesgo de confusiones a la hora de interpretar los resultados. Para continuar con el paradigma de SRI, la operación de erosión se hace sobre el código RLE  $c$ , lo cual evita tener que regenerar la imagen para aplicar las operaciones descritas en el apartado 2.5.1. y con ello, aumentar el consumo de recursos de memoria y procesamiento.

De la misma manera que en el paso de etiquetamiento del código, en el proceso de erosión se hace comparaciones sucesivas de cada región con todas las regiones de la fila anterior (delimitadas por los marcadores de cambio de fila), se aplica un proceso de erosión similar a las operaciones morfológicas de Minkowski y se usa un vector auxiliar  $c_e$  que recibirá las regiones de la imagen erosionada, siguiendo las siguientes consideraciones:

- a) Cada vez que se encuentre un marcador de cambio de fila en  $c$ , es copiado a la respectiva posición en  $c_e$ , es decir  $c_e(i)=c(j)=0$ , donde  $i$  y  $j$  son los índices de los vectores  $c_e$  y  $c$ , respectivamente.
- b) Sea  $R1= \{c(j), c(j+1)\}$  la región actualmente observada y  $R2=\{c(k), c(k+1)\}$  cada una de las regiones de la fila anterior, se extrae una región  $R$  común entre  $R1$  y  $R2$ , es decir, donde las regiones se traslapen en el eje  $y$  (erosión vertical).
- c) Si la región  $R$  tiene menos de tres píxeles es ignorada, sino se copia en  $c_e$  como  $\{c_e(i), c_e(i+1)\}=R$  y se erosiona horizontalmente al incrementar  $c_e(i)$  y decrementar  $c_e(i+1)$ .

Esta operación de adelgazamiento se aplica repetidas veces hasta lograr eliminar cerca del 60% del área del objeto. El número de veces debe ser fijado a la hora de la implementación procurando que éste no produzca distorsión en las medidas posteriores.

### 2.9.2. Aplicación de la transformada de Hough para rectas.

Asumiendo que el vector  $c_e$  representa el código RLE de una imagen binaria  $I_{HT}$  que contiene el objeto al cual se le van a extraer las líneas por transformada de Hough, se puede plantear la siguiente expresión:

$$A(\rho, \theta) = HT\{I_{HT}(x, y)\} \quad (29)$$

Donde: A es una matriz que contiene el número de píxeles que cumplen la ecuación (28) para un determinado  $\rho$  y  $\theta$ , tal como se expresa en la ecuación (30).

HT es la definición de la Transformada de Hough.

$$A(\rho, \theta) = \sum_{x=x_{\min}}^{x_{\max}} \sum_{y=y_{\min}}^{y_{\max}} I_{HT}(x, y) \Big|_{\rho = x \cos(\theta) + y \sin(\theta)} \quad \forall \rho \in [1, \rho_{\max}]; \forall \theta \in [-45^\circ, 134^\circ] \quad (30)$$

Tanto  $\rho$  como  $\theta$  deben tomar valores dentro un rango discreto, puede ser en pasos de 1 píxel de distancia para  $\rho$  y  $1^\circ$  para  $\theta$ . El rango de  $\theta$  es de  $180^\circ$ , suficiente para encontrar líneas en cualquier orientación en la imagen. Ya que las líneas representativas probablemente se encuentren cerca de  $\theta=0^\circ$  y  $\theta=180^\circ$ , se ha optado por trasladar este rango a  $[-45^\circ, 134^\circ]$  para facilitar cálculos posteriores. A partir de las ecuaciones (24) y (25) se obtiene la máxima distancia  $\rho_{\max}$  en píxeles que puede tomar una recta contenida por ROI, según la ecuación 29.

$$\rho_{\max} = \sqrt{h^2 + w^2} \quad (31)$$

Para implementar la ecuación 28 se establece una matriz de acumulación A que inicialmente contiene ceros, se recorre el código  $c_e$  y se interpreta como una imagen, asumiendo que solo se considerarán los píxeles que se encuentren dentro de ROI. Al encontrar una región cualquiera en la fila x cuyos píxeles se encuentran entre las columnas  $y=c_e(k)$  y  $y=c_e(k+1)$ , para cada píxel se hace un barrido del ángulo y para cada

$\theta_j$  del rango se determina un valor de  $\rho_i$  definido por la ecuación (26) y se incrementa el elemento  $A(\rho_i, \theta_j)$ .

$$A(\rho, \theta) = \begin{bmatrix} A(1, -45) & A(1, -44) & \dots & A(1, 134) \\ A(2, -45) & & & \\ \vdots & & A(\rho_i, \theta_j) & \vdots \\ A(\rho_{\max}, -45) & & \dots & A(\rho_{\max}, 134) \end{bmatrix} \quad (32)$$

### 2.9.3. Determinación de parámetros representativos

Los parámetros representativos de las rectas son aquellos valores  $\rho$  y  $\theta$  para los cuales la matriz de acumulación  $A$  presenta picos. Se espera que el resultado de aplicar la transformada de Hough al objeto a medir sea una matriz con cuatro picos o máximos locales cuyos parámetros representen las cuatro líneas eje.

Para identificar los picos en  $A$  y sus correspondientes parámetros, el primer paso es anular aquellos elementos que no superan un umbral, como se expresa en la ecuación (33). El valor de umbral se puede determinar como una fracción del máximo de la matriz de acumulación para que este sea calculado dinámicamente por el sistema, según se muestra en la ecuación (34).

$$A_u(\rho, \theta) = \begin{cases} 0 & \text{si } A(\rho, \theta) < U_{HT} \\ A(\rho, \theta) & \text{En otro caso} \end{cases} \quad (33)$$

$$U_{HT} = 0.5 \cdot \max(A) \quad (34)$$

Si se despliega la matriz en un espacio tridimensional, ésta se puede observar como un conjunto de elevaciones y mediante las operaciones descritas por la ecuación (33) se eliminan los valles y se dejan los picos.

El segundo paso es evaluar la matriz  $A_u$  para que los valores alrededor de un pico produzcan un único par de parámetros que representen una línea eje de la figura. Para calcular estos valores primero se identifica el punto  $(\rho_0, \theta_0)$  donde  $A_u$  es máximo, se toma una vecindad alrededor del punto y se suma ponderadamente como se expresa en las ecuaciones (35), (36) y (37).

$$\rho_i = \frac{1}{a_i} \sum_{\rho=\rho_0-V_\rho}^{\rho_0+V_\rho} \sum_{\theta=\theta_0-V_\theta}^{\theta_0+V_\theta} \rho \cdot A_u(\rho, \theta) \quad (35)$$

$$\theta_i = \frac{1}{a_i} \sum_{\rho=\rho_0-V_\rho}^{\rho_0+V_\rho} \sum_{\theta=\theta_0-V_\theta}^{\theta_0+V_\theta} \theta \cdot A_u(\rho, \theta) \quad (36)$$

$$a_i = \sum_{\rho=\rho_0-V_\rho}^{\rho_0+V_\rho} \sum_{\theta=\theta_0-V_\theta}^{\theta_0+V_\theta} A_u(\rho, \theta) \quad (37)$$

Donde:  $\rho_i$  y  $\theta_i$  son los parámetros de la  $i$ -ésima recta.

$a_i$  es un coeficiente de normalización o ponderación.

$V_\rho$  y  $V_\theta$  son los valores que delimitan la vecindad alrededor del máximo.

Por último, se vuelven cero los elementos de la vecindad sobre los que se calcularon los parámetros de la línea para descartarlos de futuros procesos. Se repite la búsqueda de un nuevo máximo alrededor del cual se calculan los parámetros para la siguiente línea mediante el procedimiento descrito por las ecuaciones (35), (36) y (37).. Esto se lleva a cabo hasta identificar los 4 ejes, es decir, determinar los pares  $\{(\rho_1, \theta_1), (\rho_2, \theta_2), (\rho_3, \theta_3), (\rho_4, \theta_4)\}$  o hasta que la matriz  $A_u$  quede sin máximos, solo con ceros.

#### 2.9.4. Identificación de intersecciones entre rectas

La obtención de las ecuaciones polares de las rectas eje del objeto permite hallar los puntos en la imagen donde los segmentos que lo forman se interceptan. Estos puntos sirven para determinar las dimensiones de éste en píxeles, y posteriormente traducirlas a medidas físicas. También sirven como medidas de la posición y la traslación del objeto en la imagen.

Tomando como referencia la ilustración 7, planteada al inicio de este capítulo, se supone que solo se interceptan las líneas que tienden a ser perpendiculares. De ese modo, primero se establece para cada línea cuales de las líneas restantes son perpendiculares a ella y esto se hace observando si la diferencia absoluta de ángulos  $(\theta_i - \theta_j)$  es cercana a  $90^\circ$ . Entre aquellas líneas  $i$  y  $j$  que tienden a formar ángulo recto se calcula el punto de intersección  $(x_{i,j}, y_{i,j})$  por igualación de rectas usando las ecuaciones (43) y (44):

$$y_{i,j} = m_i \cdot x_{i,j} + c_i = m_j \cdot x_{i,j} + c_j \quad (38)$$

$$m_i = \frac{-1}{\tan\left(\frac{\pi \cdot \theta_i}{180^\circ}\right)} \quad (39)$$

$$m_j = \frac{-1}{\tan\left(\frac{\pi \cdot \theta_j}{180^\circ}\right)} \quad (40)$$

$$c_i = \frac{\rho_i}{\sin\left(\frac{\pi \cdot \theta_i}{180^\circ}\right)} \quad (41)$$

$$c_j = \frac{\rho_j}{\sin\left(\frac{\pi \cdot \theta_j}{180^\circ}\right)} \quad (42)$$

Al despejar la ecuación 36 y combinarla con las ecuaciones (37), (38), (39) y (40) se obtiene:

$$x_{ij} = \frac{c_j - c_i}{m_i - m_j} = \frac{\frac{\rho_j}{\sin\left(\frac{\pi \cdot \theta_j}{180^\circ}\right)} - \frac{\rho_i}{\sin\left(\frac{\pi \cdot \theta_i}{180^\circ}\right)}}{\frac{1}{\tan\left(\frac{\pi \cdot \theta_j}{180^\circ}\right)} - \frac{1}{\tan\left(\frac{\pi \cdot \theta_i}{180^\circ}\right)}} \quad (43)$$

$$y_{i,j} = \frac{m_i \cdot c_j - m_j \cdot c_i}{m_i - m_j} = \frac{\frac{\rho_j}{\sin\left(\frac{\pi \cdot \theta_j}{180^\circ}\right) \cdot \tan\left(\frac{\pi \cdot \theta_i}{180^\circ}\right)} - \frac{\rho_i}{\sin\left(\frac{\pi \cdot \theta_i}{180^\circ}\right) \cdot \tan\left(\frac{\pi \cdot \theta_j}{180^\circ}\right)}}{\frac{1}{\tan\left(\frac{\pi \cdot \theta_j}{180^\circ}\right)} - \frac{1}{\tan\left(\frac{\pi \cdot \theta_i}{180^\circ}\right)}} \quad (44)$$

Los puntos hallados pueden ser etiquetados para establecer su correspondencia con el objeto físico y calcular medidas de calibración y posición. Se siguen los siguientes pasos:

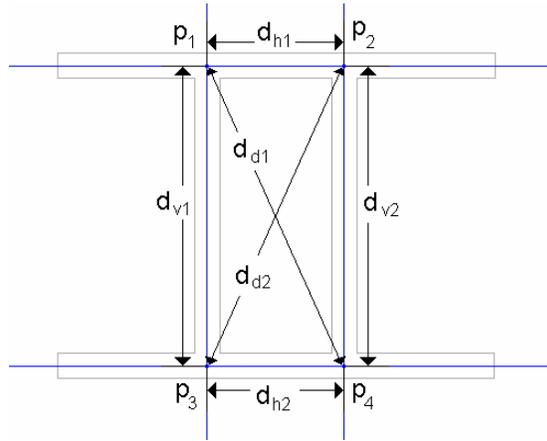
- El punto más cercano al origen, es decir, aquel cuya distancia  $\sqrt{x_{i,j}^2 + y_{i,j}^2}$  es mínima es etiquetado como el punto 1;  $p1=(x_1, y_1)$ .
- El punto que tiende a encontrarse horizontalmente alineado al punto 1, es decir, cuya distancia absoluta en el eje x ( $x_{i,j} - x_1$ ) es mínima es etiquetado como el punto 2;  $p2=(x_2, y_2)$ .
- El punto que tiende a encontrarse verticalmente alineado al punto 1, es decir, cuya distancia absoluta en el eje y ( $y_{i,j} - y_1$ ) es mínima es etiquetado como el punto 3;  $p3=(x_3, y_3)$ .
- El punto restante es etiquetado como punto 4;  $p4=(x_4, y_4)$ .

## 2.10. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 2.10.1. Medir distancias entre líneas

Al identificar el objeto en la imagen existen 4 medidas de longitud que pueden ser claramente interpretadas a partir de los puntos de intersección de los ejes. Estas medidas son: la distancia entre intersecciones sobre las líneas horizontales superior e inferior, la distancia entre intersecciones sobre las líneas verticales izquierda y derecha y las distancias de las diagonales.

**Ilustración 13. Disposición de las dimensiones del objeto calculables en la imagen**



La distancia horizontal  $d_h$  que separa a los segmentos verticales del objeto se puede calcular como un promedio de distancias, según la ecuación (45). Del mismo modo, se calcula la distancia vertical  $d_v$  y la distancia de la diagonal  $d_d$ , con las ecuaciones (46) y (47) respectivamente:

$$d_h = \frac{d_{h1} + d_{h2}}{2} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} + \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}}{2} \quad (45)$$

$$d_v = \frac{d_{v1} + d_{v2}}{2} = \frac{\sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2} + \sqrt{(x_4 - x_2)^2 + (y_4 - y_2)^2}}{2} \quad (46)$$

$$d_d = \frac{d_{d1} + d_{d2}}{2} = \frac{\sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2} + \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}}{2} \quad (47)$$

Con estas distancias se puede calcular las constantes de calibración que permiten llevar los desplazamientos del objeto en la imagen medidos en píxeles a la medida de traslación de la estructura en unidades de longitud. Se establece que las dimensiones físicas son directamente proporcionales a las calculadas en la imagen y por lo tanto se puede extraer las constantes de calibración, según lo expresado en las ecuaciones (48), (49) y (50).

$$d_y = k_y \cdot d_h \rightarrow k_y = \frac{d_y}{d_h} \quad (48)$$

$$d_x = k_x \cdot d_v \rightarrow k_x = \frac{d_x}{d_v} \quad (49)$$

$$d_D = k_D \cdot d_d \rightarrow k_D = \frac{\sqrt{(k_y \cdot d_h)^2 + (k_x \cdot d_v)^2}}{d_d} \quad (50)$$

La constante  $k_D$  se usa para validar las otras dos constantes y así aplicar un proceso de calibración. Idealmente  $k_D$  debe tender a uno (1).

### 2.10.2. Comparar centros con centroide

Si existen cuatro líneas eje representando los cuatro segmentos que forman el objeto, existen cuatro puntos de intersección de la forma  $(x_{i,i}, y_{i,j})$  formando un paralelogramo. Si existen los cuatro puntos se puede hallar las coordenadas de un nuevo centro del objeto basado en las líneas eje denominado  $(\bar{x}_{HT}, \bar{y}_{HT})$  al aplicar un procedimiento similar al centro de ROI como se muestra en las ecuaciones (51) y (52).

$$\bar{x}_{HT} = \frac{\sum x_{i,j}}{4} \quad (51)$$

$$\bar{y}_{HT} = \frac{\sum y_{i,j}}{4} \quad (52)$$

Se supone que el centroide, el centro de ROI y el centro basado en líneas eje deben converger en el mismo punto. Sin embargo, debido a alteraciones en la captura y procesamiento de la imagen, estos puntos solo convergen en una vecindad. Entonces, para definir cual de los puntos es el que mejor representa la posición del objeto, se deben aplicar algunas reglas de validación, como las siguientes:

- a) Cuando el objeto está formado por una única región después de aplicar el filtro de área, el centroide  $(\bar{x}, \bar{y})$  tiene mayor peso como punto de posición.

- b) Cuando el número de líneas eje obtenidas mediante la transformada de Hough es cuatro, el centro calculado basado en estas líneas  $(\bar{x}_{HT}, \bar{y}_{HT})$  tiene mayor peso que el centro de ROI  $(\bar{x}_{ROI}, \bar{y}_{ROI})$ . Si el número de líneas es menor, entonces el centro  $(\bar{x}_{HT}, \bar{y}_{HT})$  no se considera representativo y solo tiene peso el centro de ROI.
- c) Solamente cuando no se cumplan las condiciones a y b, el centro de ROI  $(\bar{x}_{ROI}, \bar{y}_{ROI})$  tendrá mayor peso que el centroide.

### 2.10.3. Aplicación de un filtro de media móvil

El filtro de media móvil es un filtro digital pasabajos de tipo IIR, que usa respuesta recursiva. Tiene como características que mantiene valores DC, presenta una buena estabilidad en frecuencia, presenta una muy baja atenuación en banda pero solamente se pueden seleccionar algunas frecuencias de corte. Las ecuaciones de cálculo parten de una sumatoria de los últimos valores de la variable medida, que al simplificar da como resultado las ecuaciones (53) y (54).

$$X_0 = X_{-1} + \frac{(x_0 - x_{-n})}{n} \quad (53)$$

$$Y_0 = Y_{-1} + \frac{(y_0 - y_{-n})}{n} \quad (54)$$

Las ecuaciones (53) y (54) necesitan del valor actual de centro del objeto y dicho valor en n instantes anteriores de muestreo. No se requiere realizar la sumatoria, sin embargo se requiere almacenar todos los últimos n valores sin filtrar. Cuando n=2, es más adecuado usar las expresiones (53) y (54).

$$X_0 = \frac{x_0 + x_{-1}}{2} \quad (55)$$

$$X_0 = \frac{y_0 + y_{-1}}{2} \quad (56)$$

El filtrado de la señal mejora la precisión de la medida porque reduce el ruido que se encuentra en las frecuencias más altas, pero reduce el ancho de banda que se puede monitorear. Si la captura de imágenes se realiza a intervalos de  $\tau$  segundos, el ancho de banda de la señal de salida es  $BW = \frac{1}{n \cdot \tau}$  hertz. Así, cuando  $n=2$ , el ancho de banda se reduce a la mitad que si no se aplicara el filtro.

### **3. DISEÑO DE UN SISTEMA PROTOTIPO PARA MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS EN UNA ESTRUCTURA**

Para medir desplazamientos en una estructura civil como un puente, un túnel o una presa es necesario identificar dos puntos en esta: uno que represente la región de mayor desplazamiento debido a una deformación elástica o inelástica, donde se ha de instalar el objeto a identificar y fuente de luz; el otro debe ser un punto inmóvil adecuado para instalar el sensor de imagen tal que no haya perturbaciones del ambiente o movimiento transmitido por la estructura.

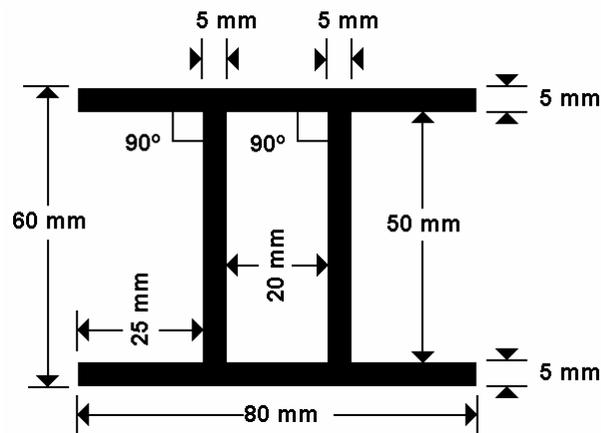
Se ha construido un sistema prototipo que permite evaluar el comportamiento de la solución propuesta en capítulos anteriores, usando un sistema de visión artificial que observa un objeto que se adhiere solidariamente a la estructura a medir. Además del objeto y la cámara, se requieren otros elementos como: un motor de procesamiento con los algoritmos adecuados, una interfaz de adquisición de imágenes entre el sensor y el motor de procesamiento y un mecanismo de configuración y despliegue. Todos estos conforman el sistema de medición de desplazamiento en dos ejes basado en técnicas de visión artificial.

#### **3.1. FUENTE DE LUZ**

Este aspecto de vital importancia proporciona condiciones de iluminación uniformes e independientes del entorno, facilitando en lo posible, la extracción de los rasgos de interés para la aplicación: valores de desplazamiento en unidades físicas. La iluminación fue construida mediante un conjunto de LEDs rojos alimentados por una fuente DC que permite un brillo constante y sin parpadeos. Los LED proporcionan una adecuada intensidad en el espectro de mayor sensibilidad de la cámara y una vida media de hasta 100000 horas.

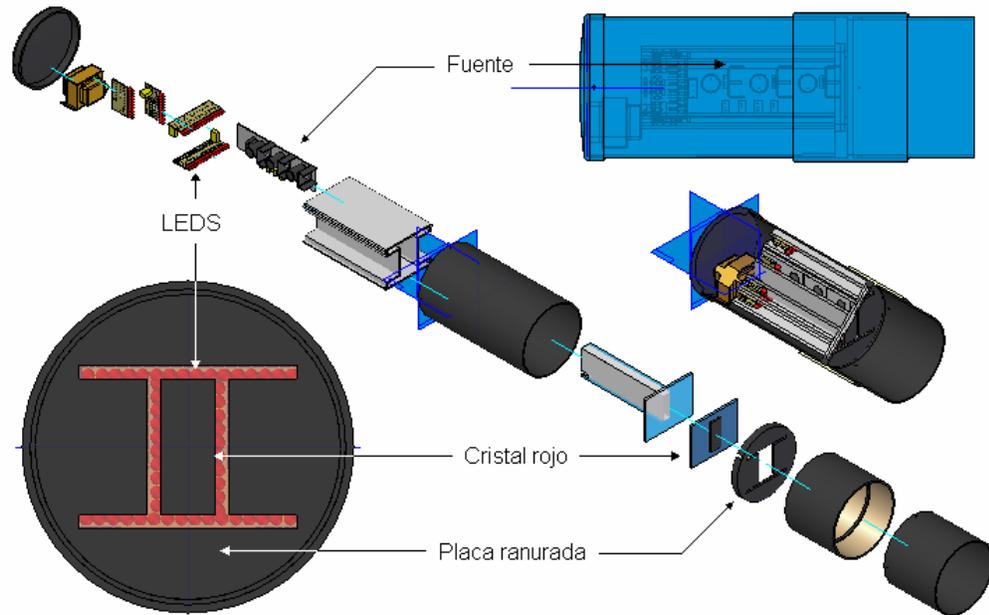
La luz producida llega a un difusor que la vuelve homogénea, tenue y estable; de esta manera la intensidad cambia muy poco con el ángulo de observación. Luego, ilumina un cristal rojo para generar una iluminación de color constante y para evitar que otras fuentes externas superpongan luces de otras tonalidades. Una placa ranurada con la forma del objeto deseado se antepone a la luz emitida a través del cristal y esta figura luminosa se convierte en el objeto a medir por el sistema. La ranura tiene la forma que se muestra en la ilustración 1 con una separación de 60 mm entre las franjas horizontales y 20 mm entre las franjas verticales. Estos datos pasan a ser constantes en el programa de procesamiento de la imagen y permiten calcular los factores de conversión de medidas.

**Ilustración 14. Dimensiones del objeto observado generado a partir de la fuente de luz**



La fuente de iluminación y el objeto observado por el sistema se han combinado en un solo componente para formar un objeto emisor y de esta manera lograr una alta concordancia entre las condiciones de iluminación y las características del objeto. La iluminación emisiva es la fuente de iluminación más fácil de manejar ya que proviene directamente de los objetos y no de fuentes externas; de esta manera se evita considerar modelos matemáticos de reflexión. Internamente la iluminación es de tipo posterior para delinear el contorno de la ranura que le antecede y de esta manera trazar una silueta de muy alto contraste con el fondo. Todo el sistema está contenido en un cilindro negro que lo protege de las condiciones ambientales y contribuye a generar un fondo contrastante, como se muestra en la ilustración 15. Una descripción más detallada de este módulo puede verse en el anexo A: Modelo de Descripción de la Solución.

**Ilustración 15. Descripción del módulo de iluminación y objeto observado**



### 3.2. SENSOR DE IMAGEN

El sensor encargado de registrar el objeto en su entorno es una cámara de video a color con prestaciones industriales. En este prototipo se usa la cámara mvBlueFOX-102C fabricada por Matrix Vision construida con un sensor de tecnología CMOS en formato ½' (Matrix Vision, 2006). Los sensores CMOS permiten capturar imágenes con altas resoluciones pero a velocidades de captura lentas.

La resolución de la imagen de salida es de 1280 x 1024 píxeles sobre un área de sensor de 7,8 x 6,2 mm, formada por un arreglo tipo mosaico de Bayer RGB. Por el teorema de Whittaker-Kotelnikov-Shannon, si las frecuencias de muestreo espacial en los ejes X y Y de la imagen se definen como:

$$F_x = \frac{1}{\Delta x} = \frac{\text{número de filas}}{\text{alto del sensor}} \quad (57)$$

$$F_y = \frac{1}{\Delta y} = \frac{\text{número de columnas}}{\text{ancho del sensor}} \quad (58)$$

Entonces, el mínimo detalle a captar debe ser al menos 2 veces el tamaño de un píxel, proyectado en el sensor. Es decir, que las distancias  $u$  y  $v$  definidas en las ecuaciones definen el mínimo tamaño de un objeto o la mínima traslación sobre la imagen para que sea detectada por el sensor.

$$u = 2 \cdot \Delta x = \frac{6,2mm}{1024} = 6,05nm \quad (59)$$

$$v = 2 \cdot \Delta y = \frac{7,8mm}{1280} = 6,09nm \quad (60)$$

A manera de ejemplo, si se utilizan lentes que proyecten una imagen 500 veces más grande (de alrededor de 400 x 300 mm), la mínima traslación del objeto de interés registrada por la cámara será de aproximadamente 0,3 mm.

La velocidad de captura a la máxima resolución es 18,2 cuadros por segundo y esta se denomina frecuencia de muestreo temporal. Por el teorema de Nyquist, esta frecuencia determina el máximo ancho de banda de las vibraciones que se van a monitorear en el dominio del tiempo con el sistema de visión, siendo este como máximo la mitad de la frecuencia de muestreo. De esta manera, el máximo ancho de banda de las vibraciones observadas correctamente por el sistema es de 9.1 Hz.

La profundidad de color es 8 bits por plano, es decir, 24 bits por píxel extraídos a partir del filtro de Bayer. El valor ideal del número de bits está relacionado con la relación señal a ruido S/N (en el ancho de banda) de la cámara. Este está establecido como aproximadamente 45 dB dado que hay 6 dB por bit, entonces 8 bits cubren el rango. Además, el escoger 8 bits permite almacenar la imagen por bytes (Nixon y Aguado, 2002). El rango dinámico de la cámara seleccionada es 57 dB y la calidad del color es suficiente para la implementación del filtro basado en color propuesto en el capítulo anterior. Cabe resaltar que la respuesta espectral presenta mayor sensibilidad para los fotodetectores

rojos en un amplio rango de longitudes de onda, lo cual es acorde con la disposición de luces del objeto observado.

La cámara opera por escaneo progresivo lo cual evita problemas de interlineado al capturar objetos en movimiento. Se considera además que la velocidad de exposición (de hasta  $1/10^6$  s) es suficiente para una buena captura con el nivel de brillo adecuado, evitando el emborronamiento producido al observar objetos en movimiento. El tiempo de exposición es inversamente proporcional al brillo de la imagen capturada y cuando se reduce notablemente, la cámara solamente es sensible a los objetos más brillantes como es el caso experimentado en este prototipo.

### **3.3. INTERFAZ DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES**

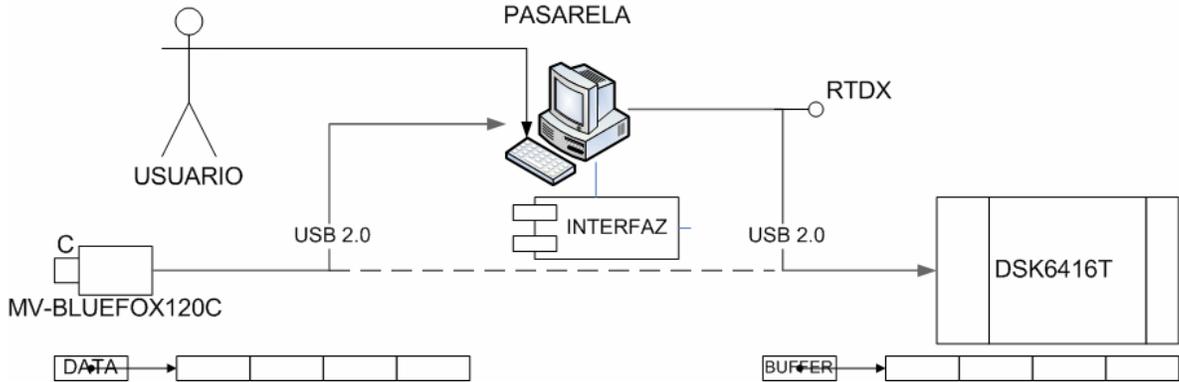
La interfaz entre el sensor de imagen y el motor de procesamiento es un computador personal que actúa como pasarela. El computador dispone de comunicación USB v2.0 que le permite una transferencia de hasta 480 Mbps; de esta manera se conecta por un puerto la cámara de video para capturar cada marco o imagen y por otro puerto se envía esa imagen al DSP en forma de arreglo de datos.

En el computador se ha definido una aplicación software en lenguaje C++ soportada por el sistema operativo Windows para la interacción con la cámara y la tarjeta del DSP. Windows provee un conjunto de controles de comunicación por puertos denominados COM bajo la arquitectura del sistema y definidos por las *librerías de enlace dinámico*. Además, tanto los proveedores de la cámara como del DSP, ofrecen un conjunto de librerías para la creación de aplicaciones de intercambio de datos bajo OLE (Intercambio de Objetos Enlazados). Esta arquitectura se presenta en la ilustración 16.

Primero, para recibir en el computador cada imagen capturada por la cámara se usa las librerías *mvDeviceManager.lib* y *mvDisplay.lib* que incluyen los archivos de cabecera *mvIMPACT\_acquire.h*, *mvDeviceManager.h*, *mvDisplayWindow.h*, *mvDisplay.h*, y *mvPropHandlingDatatypes.h* provistas en el software de la cámara (Matrix Vision, 2006).

Estas librerías son las que establecen la comunicación con los controladores y establecen un canal en el puerto USB.

**Ilustración 16. Conexión de la pasarela entre el DSP y la cámara**



En el programa que corre en el computador, se establece un objeto que administra la conexión y un puntero que identifica el dispositivo y mediante ellos se solicita una imagen que se almacena en un arreglo de caracteres. Tras un pequeño tiempo de espera, el sistema responde y entrega un objeto con el contenido de la imagen, la cual se almacena en el arreglo, siguiendo una organización inteligible para el resto del sistema. En este punto, la imagen está lista para ser desplegada en pantalla.

Luego, para enviar la imagen al DSP como un flujo de datos se usa las librerías *rtdx.dll* y *rtdxint.dll*. Estas librerías permiten establecer canales de comunicación usando RTDX (del inglés Real Time Data Exchange: Intercambio de Datos en Tiempo Real). Los valores de cada píxel en el arreglo son copiados en un arreglo de datos especial, cuyo tipo está predefinido como *SAFEARRAY*, adecuado para el envío de datos al DSP. Usando COM se abre un canal de comunicación mediante USB, el mismo que deben compartir el computador y la aplicación en el DSP. El canal de comunicación establecido permite una tasa de transferencia de 2MB por segundo, pero aún así, es adecuada para la aplicación planteada.

Por otra parte, mediante las librerías *rtdx.lib* y *rtdx64xx.lib* que incluyen los archivos de cabecera *target.h* y *rtdx.h*, en el DSP se establece un canal de comunicaciones RTDX, el

mismo que se ha definido en el computador y se habilita un banco de memoria para recibir la información. En cuanto el canal está disponible y el DSP ha liberado la memoria dispuesta para recibir los datos, la imagen se envía y el proceso se repite en ambas partes.

Por último, los canales que comunican con la cámara y el DSP se cierran y los recursos se liberan.

### **3.4. ALGORITMOS DE ANÁLISIS DE IMAGEN**

#### **3.4.1. Adquisición**

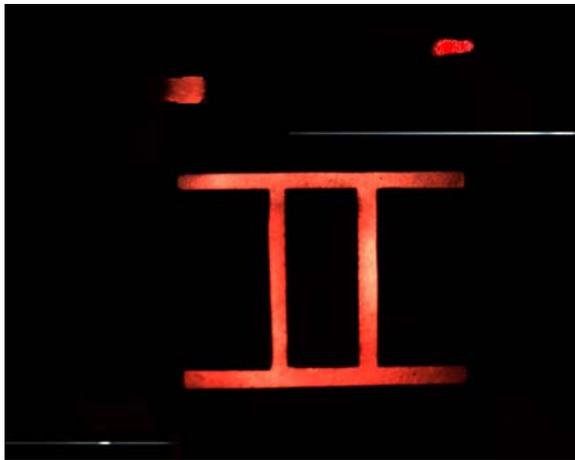
La imagen proveniente de la cámara llega a un arreglo que contiene secuencialmente los valores RGB de cada píxel. Al momento de recibirla se aplica una operación de filtrado de color, de acuerdo a las características del objeto y el resultado se almacena en una matriz que representa una imagen en escala de grises.

Para el desarrollo del filtro se aplica una filosofía similar al filtro de color programable PCF mencionado en el capítulo 2, sección 2.3.2 y se parte del modelo RGB para reducir la imagen de tres colores a uno que represente y contenga el objeto a identificar. Esto se logra al restarle al plano rojo los otros dos planos, similar a como se expuso en el capítulo 2, sección 2.3.2. El filtro de color aquí planteado es una operación aritmética local que se aplica al almacenar la imagen en el sistema, de esta manera se reduce el tamaño de la memoria requerida a la tercera parte y por consiguiente se reduce el tiempo de procesamiento en las etapas posteriores. En la ilustración 17 se aprecia el efecto de este método

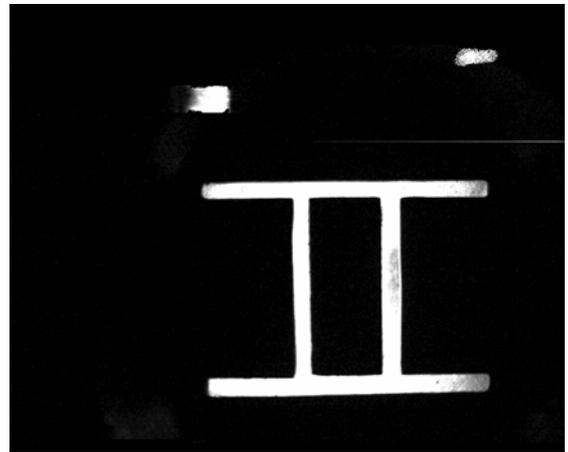
El resultado de la aplicación del filtro es una imagen en escala de grises cuya intensidad depende de la intensidad y pureza de color rojo en cada uno de los objetos y se encuentra en escala de [0,255] por cuanto se puede almacenar cada píxel en un octeto de

memoria. Este método actúa como un filtro pasa altos y tiene como característica el incremento del contraste entre los objetos de color rojo con respecto a los demás objetos y el fondo, lo que permite una mejor umbralización posterior. Sin embargo, este filtro no es un detector de bordes porque no los destaca en la imagen con respecto al objeto mismo.

**Ilustración 17. Comparación entre la imagen original y la filtrada por color**



(a) Imagen original



(b) Imagen filtrada por color

Inmediatamente se realiza la operación de filtro, el resultado del píxel se utiliza para acumular en un vector de histograma el número de píxeles que tienen cada uno de los valores de la escala. Como resultado del aumento de contraste, el filtro de color produce un ensanchamiento de la parte central del histograma hacia los extremos inferior y superior del mismo en la escala de grises. (Ver ilustración 17).

### 3.4.2. Segmentación

En el histograma de la ilustración 18 que corresponde a la imagen con el color rojo realzado se observa una región de valle hacia el centro de la escala entre dos regiones de picos en el extremo más oscuro (fondo) y en el extremo más claro (objeto). Esta región de valle se encuentra generalmente entre los niveles  $i = 50$  e  $i = 150$ . El umbral  $T$  se fija de acuerdo al histograma de la imagen después del proceso de filtrado de color y ya que se tiene un amplio rango para determinarlo se ha optado por elegir como umbral el mayor

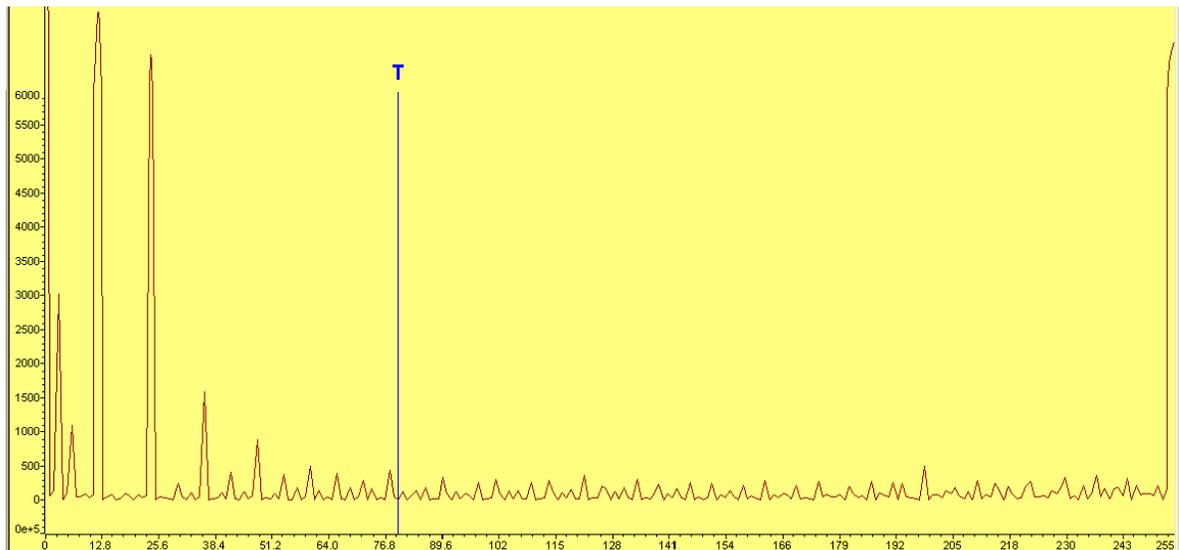
nivel de intensidad en el valle donde se encuentre un mínimo, tal como se muestra en las expresiones siguientes:

$$h_{\min} = \min\{h(50), \dots, h(150)\} \quad (61)$$

$$T = \max \left( i \mid h(i) = h_{\min} \right) \quad (62)$$

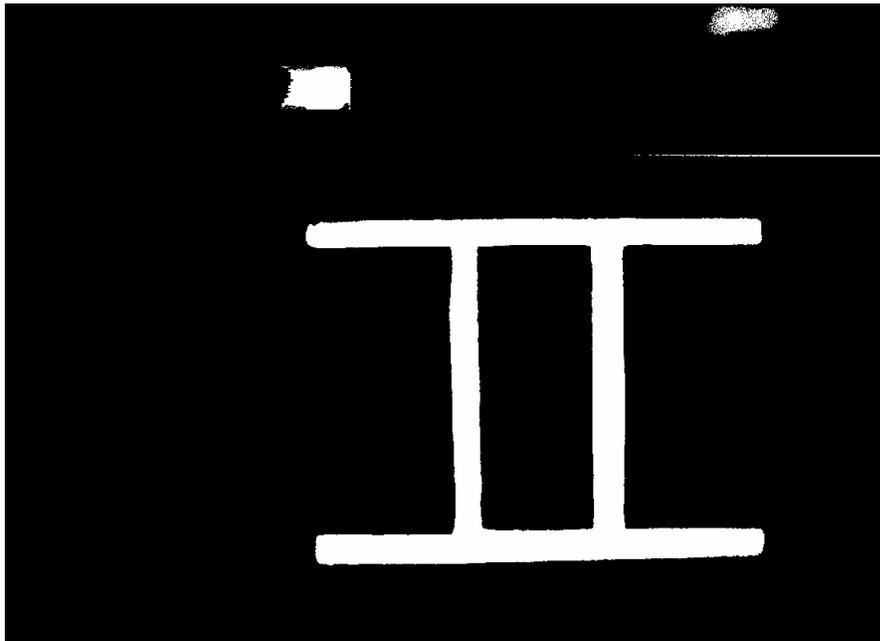
La umbralización al igual que el filtro de color es una operación lógica local, por lo que se puede aplicar al momento de almacenar la imagen de entrada. Sin embargo en este caso, al requerirse el histograma total para definir el umbral, la segmentación se aplica después de almacenada la imagen. Ya que el resultado solo puede tomar dos valores, cada píxel se puede almacenar en un bit y por lo tanto en esta etapa hay una considerable reducción de memoria. No obstante, dicha reducción no se aplica al tiempo de procesamiento en las etapas posteriores.

**Ilustración 18. Histograma de la imagen filtrada por color**



La imagen resultante del método de segmentación y que está contenida en formato de un bit por píxel puede apreciarse en la ilustración 19.

**Ilustración 19. Imagen segmentada por umbralización automática**



### **3.4.3. Acondicionamiento de la imagen binaria**

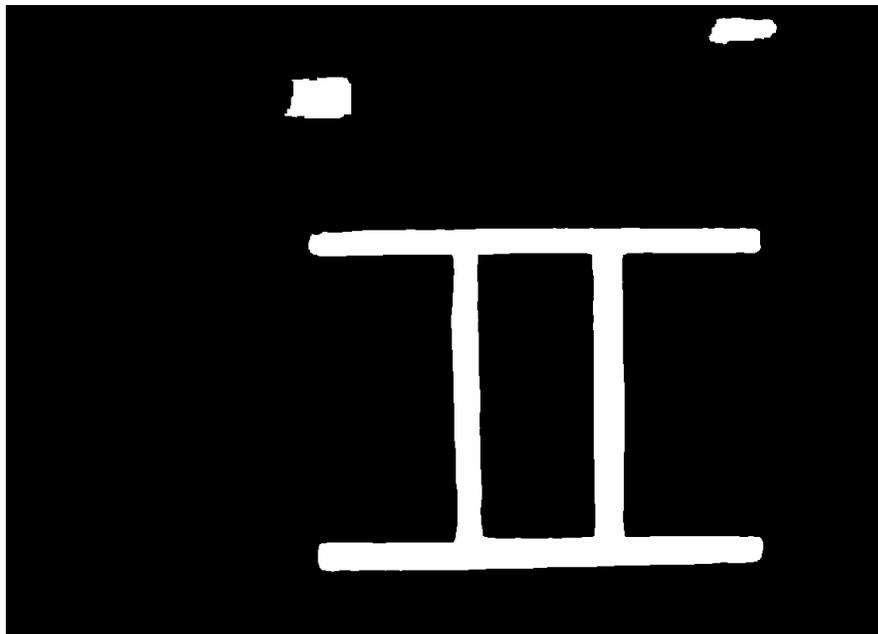
Para acondicionar la imagen antes de extraer medidas, se establece un filtro morfológico que se elaboró realizando dos erosiones sucesivas, seguido de dos dilataciones sucesivas. Cabe resaltar que estas operaciones requieren que la imagen esté almacenada con un formato especial donde se almacenen 8 bits por píxel con formato LITTLE ENDIAN (formato de asignación de memoria que define cual es el byte de más peso y el de menos peso en palabras de hasta 32 bits) y que el ancho de la imagen sea un múltiplo de 32.

Para este filtro se definió como elemento estructurante una matriz cuadrada de '1' de tamaño 3x3. Se escogió este elemento estructurante porque produce poca distorsión en la forma y orientación del objeto, aplicada sucesivamente es suficiente para eliminar objetos y huecos pequeños y reconstruir la forma básica del objeto a medir.

La erosión se realiza mediante un conjunto de operaciones AND entre bits y operaciones de desplazamiento de bits para establecer la conectividad definida por  $v$ , siguiendo la definición dada en el capítulo 2. El resultado de esta operación, aplicada sucesivas veces, es la eliminación de píxeles desconectados de los objetos, el adelgazamiento y definición de los bordes y la reducción y borrado de objetos muy pequeños.

De la misma manera que la erosión, la dilatación se produce a través de una serie de operaciones OR entre bits y operaciones de desplazamiento de bits, con el mismo elemento estructurante. El resultado de esta operación, aplicada sucesivamente, es el rellenado de huecos, la conexión de píxeles cercanos y regiones próximas, el engrosamiento y suavizado de los bordes y el crecimiento de objetos pequeños. Luego, de ello, las erosiones siguientes generan un adelgazamiento y definición de la imagen que facilitan su interpretación posterior. Después del filtro morfológico el resultado es una imagen como la mostrada en la ilustración 20.

**Ilustración 20. Imagen binaria filtrada morfológicamente**



Una vez los objetos tienen bordes suavizados y definidos, la imagen se comprime usando codificación RLE como se explicó en el capítulo anterior. El código RLE expresado en

este algoritmo está modificado para que indique por cada fila y en cada transición la posición del primer y último píxel que contiene '1' en esa transición y siempre por pares de inicio y fin de la región. Se agrega un '-1' como marcador de cambio de fila para indicarle al resto del proceso el paso de una fila a otra al leer secuencialmente el código. El algoritmo de codificación hace un barrido de izquierda a derecha y de arriba abajo a la imagen resultante de la ecuación 12, partiendo desde la primera fila en la parte superior y registrando el inicio y fin de cada zona blanca, de acuerdo al sistema de coordenadas establecido.

En este caso, para etiquetar la imagen, se crea un vector denominado  $e$ , del mismo tamaño que el código RLE que la representa, de tal manera que, mientras la posición  $i$ -ésima del código representa una transición de una región, la misma posición  $i$ -ésima en el vector de etiquetas representa la pertenencia de la región a un objeto. El etiquetamiento define si hay conectividad con los 8 vecinos al buscar un rango entre dos regiones sobre filas contiguas que sea común a las dos. Cuando esto ocurre, se asigna la etiqueta de una región a la otra o se actualiza para mostrar que pertenecen al mismo objeto. El proceso se repite varias veces hasta que el número de objetos encontrados sea mínimo.

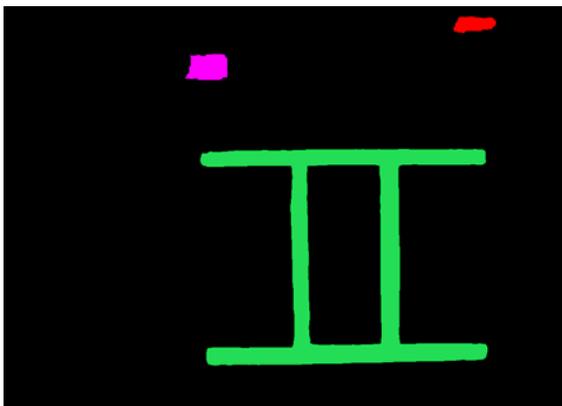
Según pruebas iniciales hechas con imágenes tomadas en ambientes simulados y bajo la premisa que son escasos los elementos de color rojo en el fondo de la imagen, se puede asumir que el objeto de interés es el de mayor área. Aún más, cuando el objeto se encuentre fragmentado en varias regiones debido a problemas con la iluminación o la interferencia del ambiente, estas regiones son siempre mayores que los objetos adicionales que se encuentren en la imagen. Por esta razón, al aplicar un filtro que remueva los objetos pequeños inferiores a un umbral de área previamente calculado, se pretende dejar únicamente la región o regiones que conforman el objeto. Esta operación complementa la acción realizada por el filtro morfológico y permite extraer enteramente el objeto de estudio. Para ello, se calcula el área de cada objeto al sumar la longitud de cada una de las regiones que la conforman. Luego, se determina la máxima área, que sirve para definir el umbral como un porcentaje de esta.

Luego de varias pruebas, se estableció dicho umbral en  $\frac{1}{4}$  de la máxima área, es decir que, si el objeto de interés se ve segmentado en dos regiones y una de ellas tiene tan

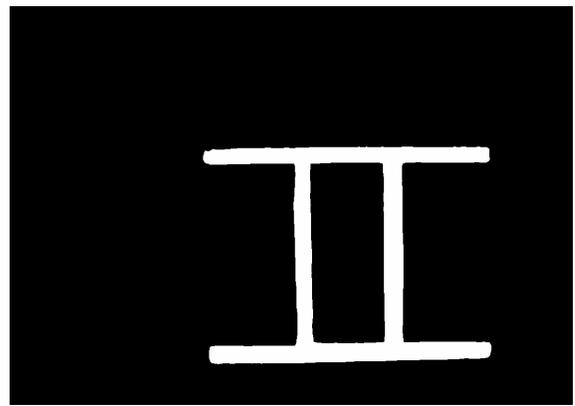
solo un  $\frac{1}{4}$  del área de la otra, ambas regiones permanecerán en la imagen. En contraposición, las regiones más pequeñas, incluso las que perteneciendo al objeto, quedan como residuos en el proceso de segmentación y filtrado morfológico, son eliminadas de la imagen.

Por último, se mantienen en el código las regiones de los objetos cuya área supera el umbral mientras se descartan las demás. A partir de este momento se considera que todos los objetos presentes en la imagen hacen parte del objeto a medir y se interpretan como uno solo. El objeto a medir presenta un aspecto como el mostrado en la ilustración 21.

**Ilustración 21. Imagen etiquetada y filtrada mediante el código RLE**



(a) Objetos etiquetados



(b) Con remoción de objetos pequeños

#### **3.4.4. Extracción de características**

Al medir los objetos presentes en la imagen, las características que interesan son aquellas que brindan información sobre la posición del objeto de interés. Tal es el caso del centroide que, idealmente, debe determinar la posición del centro del objeto. Como el objeto no cambia de forma ni de escala al transcurrir el tiempo, el cambio de posición del objeto se refleja en un cambio directo en el centroide. El centroide se calcula al sumar las coordenadas de todos los píxeles de la imagen descritos por el código RLE, en dirección de los ejes coordenados X, Y y luego ponderar con la medida del área.

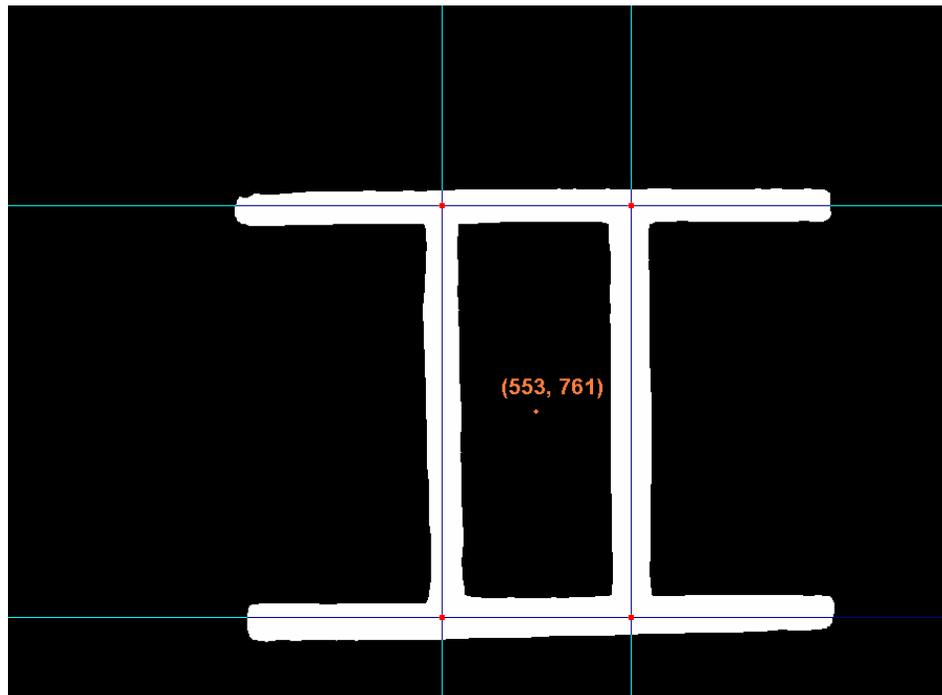
Otra medida que está relacionada con la posición es una región de interés ROI que está determinada por el mínimo rectángulo que contiene a todo el objeto. Este se determina al identificar el píxel más cercano y el más alejado de los ejes coordenados. Debido a la simetría del objeto, se considera que el centro de la región ROI debe coincidir con el centro del objeto y por tanto, desplazarse cuando el objeto se traslade. En la ilustración 22 se comparan los valores de centroide y centro de ROI; allí el punto (555, 765) corresponde al centroide y el punto (551, 759) corresponde al centro de ROI.

**Ilustración 22. Comparación entre el centroide y el centro del rectángulo ROI**



Una última medida que representa al objeto son los ejes de los segmentos que lo componen y cuyas intersecciones determinan los puntos de conexión de dichos segmentos. Por la forma del objeto, estos puntos de conexión delimitan un pequeño paralelogramo cuyo centro coincide con el centro del objeto y se traslada con él. Para determinar los ejes es necesario adelgazar el objeto mediante seis erosiones sucesivas y luego aplicar un método para detección de líneas basado en una simplificación de la transformada de Hough que pueda operar sobre el código RLE. Esta transformada entrega una matriz de acumulación, donde la posición de los máximos representa los parámetros  $p$  y  $\theta$  de las líneas eje. Al hallar a lo sumo cuatro líneas eje, se puede calcular matemáticamente los puntos de intersección que luego se ordenan para medir las distancias entre ellos. Las líneas eje se muestran en la ilustración 23.

**Ilustración 23. Líneas eje obtenidas por transformada simplificada de Hough**



El punto promedio de las cuatro intersecciones representa el centro del objeto y las distancias entre ellos corresponden a longitudes físicas que permanecen estáticas por cuanto las primeras sirven para calcular las constantes de calibración a unidades físicas. Sin embargo, no siempre puede realizarse este procedimiento y en ese caso se mantienen las constantes de ciclos anteriores.

### **3.4.5. Interpretación de los resultados**

Para interpretar los resultados obtenidos en la extracción de características se requiere conocer el número de objetos detectados tras el filtro de objetos pequeños y el número de intersecciones entre ejes.

Los pesos asignados sirven como ponderadores para calcular un punto medio que represente la posición del objeto. Estos pesos se asignan de acuerdo a los casos mostrados en la tabla. Con los pesos asignados se calcula el punto centro  $(x_0, y_0)$  del

objeto que será medido cuadro a cuadro, teniendo en cuenta que los centros y el centroide están referidos al origen de ROI. Este valor centro ya representa la traslación en unidades físicas (milímetros) del objeto y por ende, de la estructura.

Como se muestra en las ecuaciones 63 y 64, los pesos determinan la medida efectiva de traslación y mediante las constantes de calibración que se encuentran al obtener los ejes por transformada de Hough y sus respectivas intersecciones, dicha traslación pasa a ser la medida de desplazamiento, objetivo de este sistema.

**Tabla 1. Condiciones para validar las medidas de centro obtenidas**

CASO	CONDICIONES	CENTROIDE	HOUGH	ROI
1	Una (1) región forma el objeto. Hay cuatro (4) líneas eje.	$P_C = 0.7$	$P_{HT} = 0.2$	$P_{ROI} = 0.1$
2	Una (1) región forma el objeto. Hay menos de cuatro (4) líneas eje.	$P_C = 0.7$	$P_{HT} = 0.0$	$P_{ROI} = 0.3$
3	El objeto consta de dos (2) o más regiones. Hay cuatro (4) líneas eje.	$P_C = 0.2$	$P_{HT} = 0.7$	$P_{ROI} = 0.1$
4	El objeto consta de dos (2) o más regiones. Hay menos de cuatro (4) líneas eje.	$P_C = 0.3$	$P_{HT} = 0.0$	$P_{ROI} = 0.7$

$$x_0 = k_x \cdot (x_{\min} + P_C \cdot \bar{x} + P_{HT} \cdot \bar{x}_{HT} + P_{ROI} \cdot \bar{x}_{ROI}) \quad (63)$$

$$y_0 = k_y \cdot (y_{\min} + P_C \cdot \bar{y} + P_{HT} \cdot \bar{y}_{HT} + P_{ROI} \cdot \bar{y}_{ROI}) \quad (64)$$

En este punto ya se conoce la medida real de desplazamiento que será entregada al usuario. Es opcional el uso de un filtro de promedio para suavizar la respuesta y procurar eliminar el ruido.

Los pasos de procesamiento, así como el código fuente programado en lenguaje C se pueden consultar en el anexo A: Modelo de Descripción de la Solución.

### **3.5. MOTOR DE PROCESAMIENTO**

El equipo destinado a procesar cada imagen y entregar las medidas de desplazamiento es un DSP TMS320C6416-T fabricado por Texas Instruments (Texas Instruments, 2005). Este DSP opera a una velocidad de hasta 1.2 GHz con capacidad de realizar hasta 8 Giga Flops, gracias a la capacidad de procesamiento concurrente. Tiene una memoria RAM interna de 1MB que se utiliza como memoria principal de procesamiento y donde se almacenan variables del programa como la imagen binaria, su código RLE y la matriz de acumulación por transformada de Hough, entre otros. Haciendo uso de las interfaces EMIF que posee y de la unidad EDMA se puede utilizar memoria externa para almacenamiento del programa (Flash PROM) y para almacenamiento de las imágenes capturadas (SDRAM).

Para aplicarlo a este prototipo se hizo uso de la tarjeta de desarrollo TMDSK6416-T (Spectrum Digital, 2004), la cual, además del DSP citado, contiene:

- Una unidad SDRAM de 16 MB manejada por EMIFA a 125 MHz que está destinada a contener 2 imágenes provenientes de la cámara, un historial de medidas y datos estadísticos.
- Una unidad de memoria Flash de 512 KB no volátil destinada a contener el programa.
- 8 conmutadores de configuración y un botón de reinicio.
- Una unidad CPLD con tecnología FPGA para configuración y administración de la tarjeta.
- Un emulador JTAG que permite la comunicación entre el puerto USB de la pasarela y el DSP, tanto para comunicación de datos como para programación. A través del emulador se establecen los canales de intercambio de datos RTDX.

Existe un entorno de desarrollo para programar la tarjeta, hacer depuración en circuito y evaluar el desempeño de las funciones y procesos denominado Code Composer Studio, el cuál viene junto con ella. Este entorno cuenta con un compilador de lenguaje C

optimizado para operar sobre los DSP Texas y diversas herramientas para la configuración y asignación de recursos, aunque también se puede construir la aplicación directamente en lenguaje ensamblador. Precisamente, este compilador es la plataforma de construcción del algoritmo que se describe en la sección anterior. Una información ampliada se puede consultar en el anexo

### **3.6. COSTO COMPUTACIONAL**

El algoritmo desarrollado en este prototipo debe manejar un gran conjunto de variables y búferes de almacenamiento de gran tamaño, los cuales deben compartir una memoria limitada. En especial, en los primeros pasos antes de la compresión de la imagen se utilizan matrices y arreglos con tamaños entre los 1.3 y 5.2 Megabytes que implican un alto costo computacional para la manipulación y las funciones de lectura/escritura. Todas las variables que intervienen en el proceso se almacenan en la memoria externa de la tarjeta y gracias a las unidades EDMA y al método pipeline, se cargan previamente en la memoria interna que actúa como caché de datos de segundo nivel o L2 caché.

La tabla 2 muestra una panorámica del conjunto de variables utilizadas para procesar cada imagen. Algunas de ellas son globales y estáticas, mientras otras se asignan y liberan dinámicamente conforme se van utilizando, De esta manera hay un manejo más eficiente de la memoria disponible.

Como la asignación dinámica requiere paso por referencia en el lenguaje C, entonces se construyeron todas las funciones mediante paso por referencia usando punteros de datos. Este modelo de programación es muy eficiente en el uso de memoria porque evita duplicar las variables cuando pasan como parámetros de entrada, pero requiere un gran control de las variables porque se opera con los mismo bloques de memoria en cada función llegando a modificar datos que se requiere conservar para pasarlas a funciones posteriores. Además, el paso por referencia requiere asignar previamente un bloque de memoria para recibir los resultados.

**Tabla 2. Variables utilizadas y su asignación en el programa**

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Tamaño</b>	<b>Asignación</b>
Búfer	Arreglo de datos con los píxeles provenientes de la cámara	1280 x 1024 enteros	Global y estática
I	Imagen en escala de grises	1280 x 1024 enteros	Global y estática
H	Histograma de la imagen filtrada	256 enteros	Dinámica
Ib	Imagen binaria en palabras de 32 bits	40960 enteros	Dinámica
Ib1	Similar a Ib. Recibe los resultados del procesamiento	40960 enteros	Dinámica
Código	Arreglo con el código RLE. Imagen comprimida	Mínima: 2048 bytes Típica: 10000 bytes Máxima: 694000 bytes	Dinámica
Etiquetas	Arreglo similar al código RLE que contiene las etiquetas	Mínima: 1024 bytes Típica: 5000 bytes Máxima: 347000 bytes	Dinámica
Centros	Coordenadas de los puntos centros del objeto	8 valores de punto flotante	Estática
Puntos	Coordenadas de las intersecciones de ejes	8 enteros	Estática
Acumulador	Coleccionador de votos para la transformada de Hough	2048 enteros	Dinámica

La carga computacional en cantidad de ciclos que se requieren para procesar una imagen es otro factor importante del desempeño del prototipo, pues plantea la posibilidad de procesar un determinado número de imágenes en un lapso corto. Hay que tener en cuenta que a mayor número de pasos de procesamiento, mayor efectividad en la medida pero menor número de imágenes a procesar y por ende menor ancho de banda de entrada. Análogamente, cuando las imágenes aumentan de tamaño, también se requieren más ciclos de procesamiento por etapa y por tanto se puede procesar un número menor de imágenes, pero se espera obtener una mejor precisión.

En la tabla 3 se registran los ciclos necesarios en promedio para procesar una imagen de 1280 x 1024 píxeles, la más grande que puede entregar la cámara. Estos datos fueron

calculados por las herramientas de diagnóstico y sintonía del entorno Code Composer Studio, al ejecutar el algoritmo sobre el DSP.

**Tabla 3. Carga computacional de las funciones y procesos**

<b>FUNCIÓN</b>	<b>Accesos</b>	<b>Ciclos Incluidos</b>	<b>Porcentaje</b>
Adquirir Imagen	1	34090136	45,99%
Umbralización automática	1	5857832	7,90%
Umbralización	1	5857303	7,90%
Erosión binaria	4	4627498	6,24%
Dilatación binaria	3	3469452	4,68%
Código RLE	1	20096307	27,11%
Etiquetar código RLE	1	125979	0,17%
Remover objetos pequeños	1	65536	0,09%
Medir centroide	1	4974459	6,71%
Obtener ROI sobre RLE	1	36890	0,05%
Erosionar código RLE	5	652136	0,88%
Detectar ejes sobre RLE	1	119374	0,16%
Obtener intersecciones	1	310	< 0,01%
Medir distancias	1	4208	0,01%
Calcular desplazamiento	1	944	< 0,01%
<b>Principal</b>		<b>74125521</b>	<b>100,00%</b>

En la tabla se observa que la función de adquisición de la imagen es la que más ciclos de ejecución emplea, seguida de la función de codificación. Estas dos funciones ocupan más del 70% los recursos del procesador. Sin embargo, estas funciones se realizan solo una vez por cada imagen mientras las otras se pueden realizar múltiples veces para maximizar la precisión y confiabilidad sin sobrecargar el algoritmo. El programa realiza en promedio 74'125.521 ciclos de máquina por cada imagen; a una velocidad de procesamiento promedio de 1000 MHz, el sistema estaría en capacidad de procesar hasta 13,5 imágenes por segundo, una capacidad de procesamiento acorde a las capacidades de captura y los requerimientos del entorno de trabajo planeado.

## **4. EVALUACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO**

### **4.1. PRUEBAS Y RESULTADOS**

Las pruebas hechas al sistema prototipo son un conjunto de observaciones de cómo se comporta y mide los desplazamientos del módulo de luces, bajo condiciones cambiantes de iluminación para obtener una caracterización estática y dinámica del sistema como un instrumento de medición. Estas pruebas, hechas en laboratorio, consisten en ubicar el módulo de luces frente a la cámara que se encuentra fija a una distancia tal que se pueda enfocar un plano que cubra todo el rango a medir y mover el módulo controladamente en dirección perpendicular al eje óptico de la cámara con ayuda de un tornillo micrométrico que induce los desplazamientos y un juego de rieles que controlan la orientación, mientras se inspecciona el desplazamiento con un sensor testigo y se varían las condiciones de iluminación con luz estroboscópica.

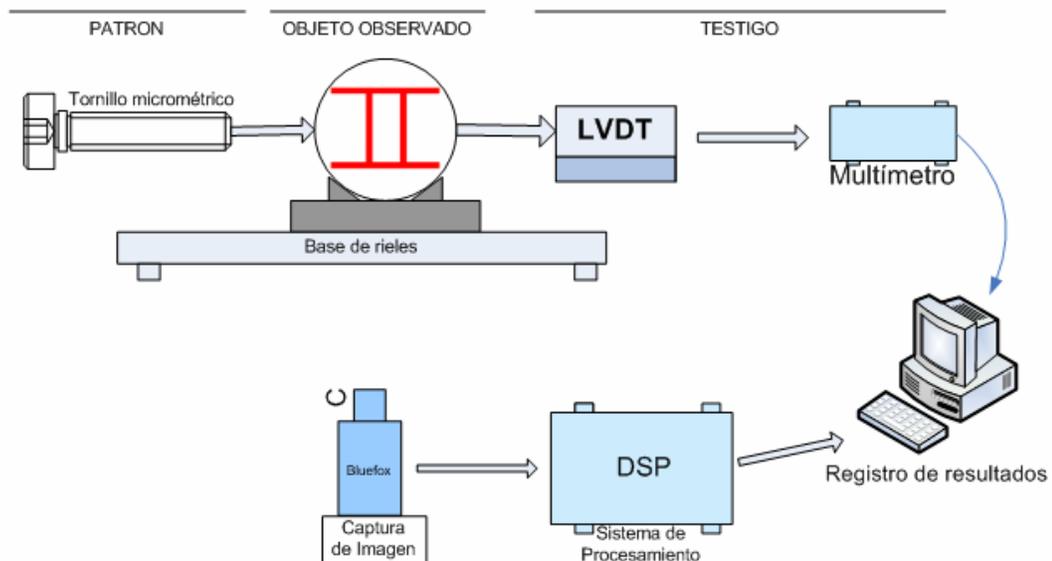
A partir de un punto de origen que se establece inicialmente, se tomaron varias medidas; unas iniciales para recalibrar el sistema en el código fuente; otras para establecer el rango de medida y el alcance al ubicar el módulo en los extremos del campo de visión de la cámara, es decir, los extremos de la imagen; otras medidas se realizaron al inducir pequeños desplazamientos con el tornillo en incrementos constantes de 50  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ , y 1 mm para determinar el error en la medida y la linealidad y unas últimas medidas se tomaron al mantener constante la posición del módulo de luces y variar tanto las luces de la sala a la vez que se agregaba luz estroboscópica, para medir la repetibilidad y precisión del sistema. El montaje de este módulo de pruebas y los resultados obtenidos por el sistema prototipo se describen a continuación.

#### 4.1.1. Módulo de pruebas:

El módulo de pruebas está compuesto por: un juego de rieles para guiar el desplazamiento, un módulo de luces que va sobre el juego de rieles, un tornillo micrométrico para desplazar el módulo de luces sobre los rieles, un LVDT (Transformador Diferencial Variable Lineal, por sus siglas en inglés) para detectar el desplazamiento efectuado por el módulo de luces, la cámara de video digital frente al módulo de luces, el DSP con el código de procesamiento y un PC al que se conecta la cámara y el DSP para registrar los resultados obtenidos.

Se coloca el módulo de luces sobre el juego de rieles, por un lado de este se coloca el tornillo micrométrico y por el otro se acopla el LVDT de tal forma que al efectuar un desplazamiento con el tornillo se transfiera el movimiento al LVDT; esto se hace para verificar que en realidad haya desplazamiento y disminuir los errores producidos cuando el objeto no se mueve realmente debido al desacople mecánico entre el tornillo y la placa que soporta el juego de rieles y por ello no se registre cambio en la medida en el sistema de Visión. (Ver ilustración 24)

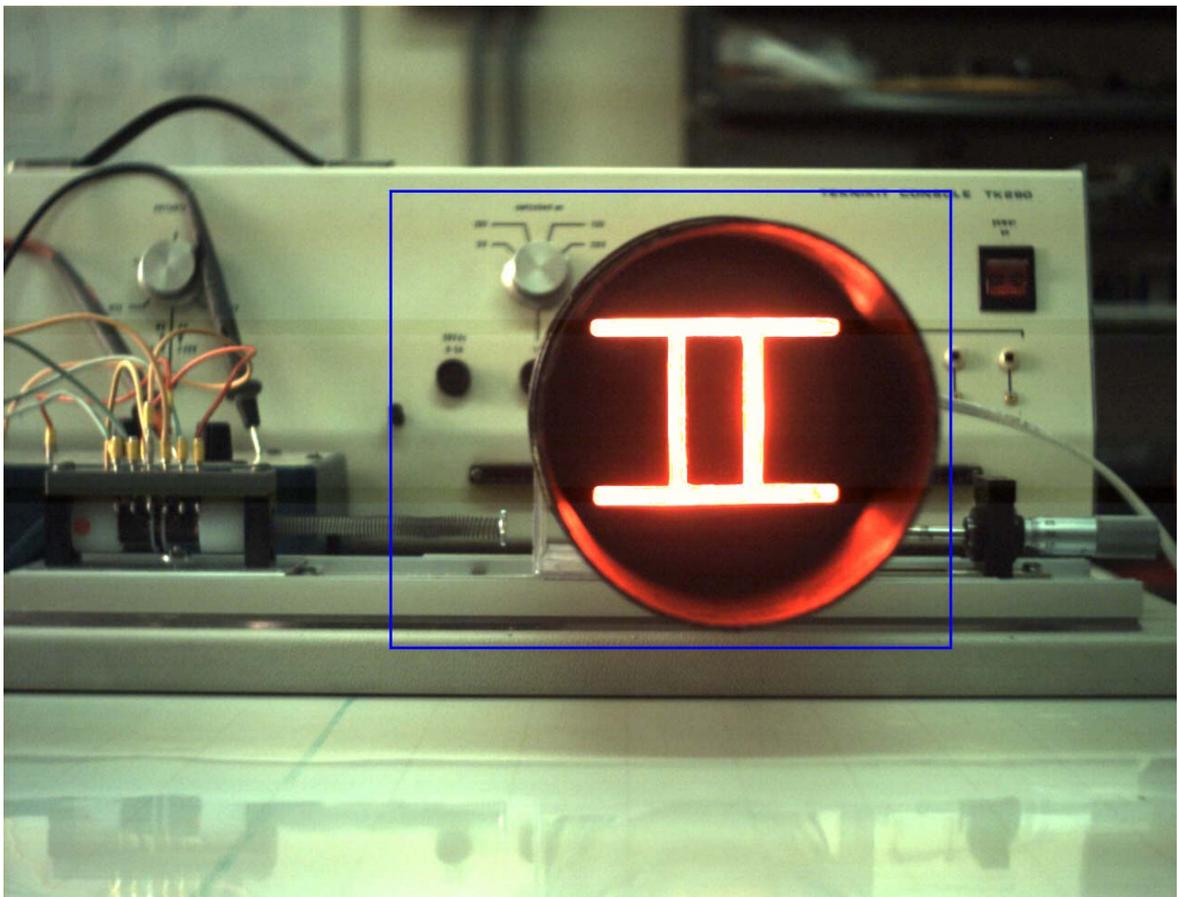
Ilustración 24. Esquema del montaje de pruebas para el prototipo



Frente al módulo de luces se ubica la cámara en un punto fijo y a una distancia que garantice que el módulo de luces esta contenido completamente en la imagen en los extremos del rango de medida.

Se ubica el sistema de luces en el punto que se toma como referencia para medida (punto (0,0)). En este punto se realiza la primera captura de video para que el sistema lo almacene como el origen del sistema coordinado. En la ilustración 25 se aprecia una vista ampliada del módulo de pruebas visto por la cámara al momento de tomar la primera imagen. A diferencia de esta imagen tomada con un tiempo de exposición de 15000  $\mu\text{s}$ , las imágenes tomadas en las medidas son capturadas con un tiempo de exposición de 350 $\mu\text{s}$  tienen un campo más cerrado y solo cubren el rango demarcado por el recuadro azul en la ilustración.

**Ilustración 25. Imagen vista por la cámara del sistema con el campo de visión ampliado**



#### 4.1.2. Intervalo de medida (Rango)

Para hallar el rango efectivo del sistema se tomó como referencia de medida una imagen con el objeto en un extremo de tal forma que se garantice que esté completamente contenido en la imagen, se calcula la posición del objeto en este punto y se repite la operación en el extremo contrario de la imagen. El rango está determinado por el tamaño de la imagen y la ROI que ocupa el objeto observado dentro de ella.

$$\text{Intervalo en } Y = \text{ancho de la imagen} - \text{ancho ROI} \quad (63)$$

$$\text{Intervalo en } X = \text{alto de la imagen} - \text{alto ROI} \quad (64)$$

Esto garantiza que el objeto siempre esté contenido dentro de la imagen capturada por la cámara. Este valor de rango es proporcional al campo de visión de la cámara, siendo tal que a mayor apertura de campo, mayor rango pero menor precisión. En las pruebas hechas el rango se ajustó para que el sistema midiera entre la posición -25mm y 63mm con respecto al punto de origen fijado por el tornillo micrométrico.

#### 4.1.3. Alcance (span)

El alcance es la diferencia entre los valores obtenidos cuando el objeto se encuentra en cada extremo del riel, dentro del rango. Las medidas de alcance en los ejes son proporcionales al tamaño de la imagen, es decir, al número de columnas y de filas.

$$\text{Alcance} = \text{Valor de medida Superior} - \text{Valor de medida Inferior} \quad (65)$$

Para el eje Y:

$$Y = 62,333\text{mm} - (-25,190)\text{mm} = 87,523\text{mm} \quad (66)$$

De igual forma para el eje X:

$$X = 112,569\text{mm} - 42,551\text{mm} = 70,018\text{mm} \quad (67)$$

Idealmente el alcance debe ser igual al rango, pero no lo es debido a los errores de medida en los extremos.

#### 4.1.4. Error

Para el cálculo del error absoluto se toma como valor ideal de la variable el dado por el tornillo micrométrico.

$$\text{Error} = \text{Valor leído por el Sistema} - \text{Valor medido en el tornillo micrométrico} \quad (68)$$

Para calcular el error se tomaron varias medidas a lo largo del rango, registrando el desplazamiento indicado por el tornillo y el valor medido por el sistema, variando el desplazamiento con pasos de 50  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$  y 1mm. En la tabla 4 se muestra el error encontrado variando el desplazamiento en pasos de 1mm (1000 $\mu\text{m}$ ), obteniéndose un error promedio de  $\pm 0.49\%$  con respecto al rango y  $\pm 1.73\%$  con respecto al valor real.

**Tabla 4. Medida de error en pasos de 1mm.**

Valor real		Valor medido		Error		%
$\Delta x$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta y$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta x$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta y$ ( $\mu\text{m}$ )	X ( $\mu\text{m}$ )	Y ( $\mu\text{m}$ )	Y
0	25000	185	25750	-185	-750	-3,00%
0	26000	185	26496	-185	-496	-1,91%
0	27000	185	27616	-185	-616	-2,28%
0	28000	185	29154	-185	-1154	-4,12%
0	29000	185	29072	-185	-72	-0,25%
0	30000	185	30788	-185	-788	-2,63%
0	31000	185	31139	-185	-139	-0,45%
0	32000	185	32654	-185	-654	-2,04%
0	33000	185	33206	-185	-206	-0,62%
0	34000	185	34333	-185	-333	-0,98%
0	35000	185	35273	-185	-273	-0,78%
Error Promedio				<b>-175,26</b>	<b>-431,36</b>	<b>-1,73%</b>
Con respecto al rango				<b>-0,25%</b>	<b>-0,49%</b>	

De la misma manera, se calculó el error para pasos de 500 $\mu\text{m}$ . téngase en cuenta que en este punto el error puede variar debido a que el sistema experimenta cambios a los cuales ya es mas sensible y dentro de la resolución de trabajo. Los resultados se muestran en la tabla 5 y se encontró un error promedio de  $\pm 0.22\%$  con respecto al rango y  $\pm 0.87\%$  respecto al valor real.

**Tabla 5. Medida de error en pasos de 500 $\mu\text{m}$**

Valor real		Valor medido		Error		%
$\Delta x$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta y$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta x$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta y$ ( $\mu\text{m}$ )	X ( $\mu\text{m}$ )	Y ( $\mu\text{m}$ )	Y
0	16500	185	16293	-185	207	1,25%
0	17000	185	17353	-185	-353	-2,08%
0	17500	185	17233	-185	267	1,53%
0	18000	185	18473	-185	-473	-2,63%
0	18500	185	18360	-185	140	0,76%
0	19000	185	20075	-185	-1075	-5,66%
0	19500	185	19112	-185	388	1,99%
0	20000	185	19864	-185	136	0,68%
0	20500	185	21085	-185	-585	-2,85%
0	21000	185	20803	-185	197	0,94%
0	21500	185	21367	-185	133	0,62%
0	22000	185	21931	-185	69	0,31%
0	22500	185	22495	-185	5	0,02%
0	23000	185	23698	-185	-698	-3,03%
0	23500	185	24707	-185	-1207	-5,14%
0	24000	185	23810	-185	190	0,79%
0	24500	185	24562	-185	-62	-0,25%
0	25000	185	25750	-185	-750	-3,00%
Error promedio				<b>-185,00</b>	<b>-192,83</b>	<b>-0,87%</b>
<b>Con respecto al rango</b>				<b>-0,26%</b>	<b>-0,22%</b>	

Igualmente, en la tabla 6 se muestra el error para pasos de 50 $\mu\text{m}$  y se encontró un error promedio de  $\pm 0.35\%$  respecto al rango y un error de  $\pm 0.98\%$  con respecto al valor real.

**Tabla 6. Medida de error en pasos de 50 $\mu$ m**

Valor real		Valor medido		Error		%
$\Delta x$ ( $\mu$ m)	$\Delta y$ ( $\mu$ m)	$\Delta x$ ( $\mu$ m)	$\Delta y$ ( $\mu$ m)	X ( $\mu$ m)	Y ( $\mu$ m)	Y
0	15000	185	16330	185	1330	8,87%
0	15050	185	15114	185	64	0,43%
0	15100	0	14414	0	-686	-4,54%
0	15150	0	15114	0	-36	-0,24%
0	15200	0	15301	0	101	0,66%
0	15250	185	14602	185	-648	-4,25%
0	15300	185	14790	185	-510	-3,33%
0	15350	185	15487	185	137	0,89%
0	15400	185	14790	185	-610	-3,96%
0	15450	185	14790	185	-660	-4,27%
0	15500	185	15674	185	174	1,12%
0	15550	185	14978	185	-572	-3,68%
0	15600	185	15166	185	-434	-2,78%
0	15650	185	15166	185	-484	-3,09%
0	15700	185	15354	185	-346	-2,20%
0	15750	185	15354	185	-396	-2,51%
0	15800	371	15354	371	-446	-2,82%
0	15850	371	15542	371	-308	-1,94%
0	15900	371	14850	371	-1050	-6,60%
0	15950	371	15730	371	-220	-1,38%
0	16000	371	15039	371	-961	-6,01%
Error promedio				<b>202,86</b>	<b>-312,43</b>	<b>-1,98%</b>
Con respecto al rango				<b>0,29%</b>	<b>-0,35%</b>	

#### 4.1.5. Repetibilidad y Precisión

La repetibilidad es la característica por la cual un instrumento entrega lecturas similares al medir el mismo estado de la variable sensada en diferentes instantes y diferentes condiciones. Para medir la repetibilidad se establecieron 4 puntos al azar y se tomaron 5

varias muestras por punto variando las condiciones de iluminación variable, en especial al ser sometido a luz estroboscópica.

De acuerdo a los datos obtenidos del análisis de estos puntos, consignados en la tabla 7, la desviación estándar es hasta  $148\mu\text{m}$  en el eje X y hasta  $619,2\mu\text{m}$  en el eje Y, lo que significa que la repetibilidad es del 99.77% sobre el rango y por tanto se puede tener imprecisión del  $\pm 0.23\%$ .

**Tabla 7. Cálculo de repetibilidad**

	PUNTO 1		PUNTO 2		PUNTO 3		PUNTO 4	
	$\Delta x$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta y$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta x$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta y$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta x$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta y$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta x$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta y$ ( $\mu\text{m}$ )
Valor real	0	-17000	0	20000	0	40000	0	43000
Muestras								
1	185	-16423	185	19488	185	40159	0	43354
2	-185	-18100	185	19488	185	40347	0	44036
3	185	-17353	0	19488	185	40159	0	44036
4	185	-17353	185	19488	185	40347	185	44105
5	0	-18100	185	20152	185	40159	0	43729
Promedio	74	-17466	148	19621	185	40234	37	43852
Desviación	148	619,2	74	265,6	0	92,1	74	281,02
%	<b>0,21%</b>	<b>0,70%</b>	<b>0,10%</b>	<b>0,30%</b>	<b>0,00%</b>	<b>0,10%</b>	<b>0,10%</b>	<b>0,32%</b>

#### 4.1.6. Exactitud

La exactitud se calcula como la diferencia entre los valores obtenidos por el sistema y el valor ideal (dado por el tornillo micrométrico). De acuerdo a los datos medidos y reales de desplazamiento consignados en las tablas 4, 5 y 6 la exactitud de este sistema es de  $\pm 312\mu\text{m}$  en promedio y como conclusión se observa que este sistema es más preciso que exacto.

#### 4.1.7. Linealidad

La linealidad basada en puntos se establece al comparar cada uno de los datos medidos con una línea recta que pasa por los puntos mínimo y máximo del rango. Si se denota como  $u$  la medida real tomada del tornillo micrométrico y  $v$  la medida esperada en el sistema, la ecuación (68) describe la líneas recta.

$$v = 0,989u - 465,989 \quad (\mu m) \quad (68)$$

Alrededor de esta recta, se calculó la diferencia entre los valores esperados y los valores medidos según las tablas 4, 5 y 6 y se encontró que la máxima diferencia o desviación de la línea es de  $1961\mu m$  para incrementos de  $50\mu m$ ,  $1933 \mu m$  para incrementos de  $500 \mu m$  y  $1929$  para incrementos de  $1mm$ .

#### 4.1.8. Fuentes de ruido

De las pruebas hechas se deduce que la principal fuente de ruido a la que se expone el sistema son las vibraciones mecánicas que se transmiten a la cámara desde cualquier elemento acoplado a la base que la soporta. Esas fuentes generan problemas de muestreo y reducen la precisión del sistema. Cuando una vibración perturba la cámara el eje óptico de ésta se traslada produciendo un movimiento aparente del objeto de medida en la imagen con componentes de alta frecuencia en espacio y en el tiempo. Las componentes de alta frecuencia en banda fácilmente son superadas por el filtro promedio implementado en el SW de procesamiento, sin embargo las componentes de alta frecuencia que no cumplen con el teorema de Nyquist generan componentes alias que deterioran la medida de traslación. En el dominio del tiempo el efecto de alias ocasiona que la señal de salida se mezcle con una componente de baja frecuencia que se puede mal interpretar como la ondulación fundamental de la estructura a medir. Esta perturbación es más crítica en cuanto mayor sea el desacople de la cámara con el objeto.

En el dominio del espacio las componentes de alta frecuencia están en íntima relación con el tiempo de exposición configurado en la cámara. Cuando el tiempo de exposición es alto se produce un efecto alias denominado emborronamiento. El emborronamiento puede ser superado en gran parte mediante el filtro morfológico. Siempre y cuando anteriormente se haya fijado una buena etapa de umbralización. El emborronamiento afecta en poca medida la precisión del sistema porque los algoritmos se basan en la información del contorno del objeto y de los ejes, mas no en elemento puntuales dentro del mismo.

Otra fuente de ruido a la que se expone el sistema es el cambio en la iluminación producido por las variaciones climáticas durante el día (sol, lluvia), el cambio de luz de día a noche, la luz de los relámpagos los cuales pueden producir cambios en la imagen capturada y alterar las condiciones de medida. En el laboratorio se simuló la variación de iluminación con un estroboscopio a diferentes frecuencias y variando la iluminación en la sala de prueba (luz de lámparas encendidas y apagadas)

La presencia de objetos entre la cámara y el objeto observado es una fuente de ruido que produce pérdida de línea de vista, desconexión de las regiones de objeto y presencia de formas extrañas cuando las luces del objeto eclipsan al elemento que interfiere.

#### **4.2. POSIBLES APLICACIONES**

El campo de trabajo del sistema propuesto está condicionado a la adaptación de lentes telescópicas que cierren el campo de visión de la cámara y permitan un acercamiento del plano donde se debe ubicar el módulo de luces. Aunque en el prototipo y la pruebas no se considera este aspecto, si se puede deducir su funcionamiento de sistemas análogos como los telescopios astronómicos y los equipos de fotografía paisajística que emplean lentes tipo zoom de más de 80 veces de aumento.

Por los resultados expuestos en el capítulo 3, sección 3, 6 y en el presente capítulo, se deduce que el sistema presenta buenas características de desempeño que lo hacen

adecuado para la medición de deflexiones grandes estructuras civiles como puentes, represas hidroeléctricas, o túneles, siempre y cuando se minimicen las fuentes de ruido.

En el caso de los puentes, este sistema es adecuado para la medición de deformaciones elásticas en superestructuras metálicas, donde las ondulaciones principales que experimenta el puente debido al paso de vehículos pesados tienen una amplitud que puede estar entre los 3 mm y los 7 cm en el centro de luz, siendo típica una deflexión máxima de 3 cm en aquellos puentes de más de 80 mts de longitud por luz. Además, en puentes de este tipo, las deflexiones son ondulaciones lentas con periodos de alrededor de 2 segundos. Un caso en particular donde se experimenta este comportamiento es el puente de Cajamarca (Colombia) sobre la vía Bogotá – La Línea – Buenaventura, la cual permite la movilización de la carga del puerto más importante del País.

También se espera que el sistema sea efectivo en la medición del desplazamiento que experimentan las represas hidroeléctricas, un movimiento transitorio y lento que ocurre cada vez que se llena los embalses, típicamente, una vez por día. Un ejemplo a considerar es la represa ubicada sobre el río Mayo en el municipio de San Pablo (Nariño - Colombia).

## 5. CONCLUSIONES

Se puede utilizar la electrónica como herramienta de soporte de procedimientos y actividades en otras ramas del saber. Tal es el caso de la salud estructural, una rama de la Ingeniería Civil que propende por el monitoreo constante y mantenimiento preventivo de estructuras utilizando diversas herramientas electrónicas y electromecánicas como sensores, software de diagnóstico y simuladores. En este campo, el presente trabajo es una muestra del potencial de herramientas que se pueden generar al combinar el desarrollo de algoritmos y la utilización de procesadores de alto desempeño.

Para diseñar el sistema propuesto en este proyecto se tuvo en cuenta el posible ambiente de la aplicación, las capacidades de los equipos que la integran y las características de desempeño del algoritmo a elegir. De hecho, se considera un avance el desarrollar una aplicación basada en visión artificial para un entorno externo, pues la mayoría de los sistemas de esta tecnología operan en ambientes cerrados donde la iluminación y las condiciones de operación puedan ser controladas.

Uno de los elementos principales en el desarrollo del sistema es el módulo de luces de referencia que combina el sistema de iluminación con el objeto visto por la cámara. Este módulo es entendido como un objeto emisor que por sus características es muy fácil de procesar en un sistema de visión ya que depende muy poco de fuentes externas de iluminación y fuentes interferentes. De este modo se puede obtener imágenes con buenas condiciones de iluminación y contraste donde el objeto se destaque sobre el fondo y facilite la implementación de filtros y procesos de medida y calibración.

El principal problema del prototipo planteado son las fuentes de ruido, en especial las vibraciones mecánicas transmitidas a la cámara y la presencia de objetos extraños entre la cámara y el módulo de luces. Las vibraciones en la cámara producen movimiento

aparente que genera error en las medidas de traslación, reduce la confiabilidad del sistema y la precisión de las medidas. Por su parte, la presencia de objetos extraños como partículas de polvo, insectos o hasta aves generan desconexión de los segmentos que componen el objeto, superponen formas ininteligibles para el motor de procesamiento y ocasionan indisponibilidad del sistema.

Las imágenes son el tipo de información más costoso de procesar electrónicamente por la cantidad de datos que la conforman. El problema se extiende cuando se requiere procesar un tren de imágenes o video, puesto que se cuenta solo con un lapso corto de tiempo para interpretar cada imagen. Para desarrollar algoritmos de procesamiento de imágenes se debe tener en cuenta el consumo de memoria y la carga computacional que debe estar acorde con las capacidades del motor de procesamiento. En este sentido, los DSP que procesan múltiples instrucciones en paralelo y palabras de datos de 32 bits son las herramientas adecuadas para implementar dicho motor.

A la hora de construir una aplicación de visión artificial para operar en un DSP se debe elegir un lenguaje de programación óptimo y con el soporte adecuado. Por la experiencia obtenida en el desarrollo de este proyecto se puede concluir que el lenguaje ANSI C es el más adecuado, porque permite hacer programas muy diversos y complejos, tener un buen dominio de los recursos y manejar eficientemente la memoria mediante paso por referencia, punteros de datos y asignación dinámica. Aunque el prototipo fue construido con lenguaje ANSI C en el entorno Code Composer Studio, un software propietario disponible con los DSP de Texas Instruments, se cree que dicha afirmación es válida para cualquier tipo de procesador de señal de alto desempeño.

Los algoritmos SRI brindan una buena solución a la necesidad de utilizar procedimientos que requieran poco consumo de memoria y alta eficiencia de cómputo, como en el caso de la programación sobre DSP. En cuanto a las imágenes se refiere, el procesamiento basado en el código RLE es una técnica de buenas prestaciones cuando se requiere hacer operaciones morfológicas, medidas de parámetros e incluso etiquetamiento, ya que

manejan datos con compresión sin pérdidas y por tanto los resultados son confiables. El operar sobre el código RLE implica procesar solamente los inicios y terminaciones de las regiones para cada fila de manera directa, mientras el cálculo sobre los elementos internos de la región se hace de manera implícita y en muchos casos es obvia al resultado de los bordes. Esta afirmación conlleva a deducir que la programación bajo este concepto reduce tanto los requerimientos de memoria como el costo computacional de los algoritmos.

El prototipo construido bajo el diseño del sistema de medición expuesto en este proyecto mostró un error del  $\pm 0.29\%$  y  $\pm 0.35\%$  para los ejes X y Y de la imagen, respectivamente; tiene una precisión de  $\pm 0.23\%$ , una exactitud de  $\pm 312\mu\text{m}$  y una falta de linealidad de alrededor de 2mm en todo el rango. Estas características lo hacen adecuado para la medición de deformaciones elásticas en puentes carreteros de superestructura metálica.

## **6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

### **6.1. RECOMENDACIONES**

El proyecto que se describe en este documento presenta una solución que ha sido probada en laboratorio simulando condiciones de un ambiente exterior. Al momento de interpretarlos, el lector debe considerar que en campo abierto las condiciones son muy cambiantes y no pueden ser recreadas en su totalidad, como tampoco son predecibles o controlables. Por eso, antes de adoptar el modelo propuesto como solución para un escenario real se debe confrontar los datos experimentados en el módulo de pruebas con resultados medidos en campo, directamente sobre la estructura a monitorear.

El hecho de haber trabajado con algoritmos SRI no descarta la posibilidad de implementar el mismo modelo de solución basado en otras técnicas como los descriptores de momentos inerciales, la búsqueda de patrones, la detección de esquinas o los códigos de cadena. El lector debe adoptar este documento como una ventana de posibilidades de adaptación y mejora, lo mismo que de búsqueda de nuevos ambientes de trabajo.

### **6.2. TRABAJOS FUTUROS**

El proyecto realizado, esboza hasta el momento un modelo de solución inicial al problema de la medida de desplazamiento. Para hacer que esta solución sea comercial y funcional en campo se requiere, por una parte reducir la cantidad de circuitos y montajes utilizados, así como optimizar el uso de los recursos disponibles y por otra optimizar el software para que sea cada vez más confiable, eficiente y adaptable. El primer paso para este propósito es sustituir la actual pasarela de datos por una tarjeta de interfaz que en lo posible comunique directamente el DSP con la cámara. El segundo paso es experimentar con sensores CCD procurando capturar la imagen directamente en la memoria del DSP sin intervención de complejos mecanismos de interfaz como tampoco de conexiones por USB.

Un tercer paso consiste en adaptar montajes de lentes a los sensores de imagen para obtener mayor profundidad de campo y de esta manera medir desplazamientos con el módulo de luces lo más distante posible; esto con el fin de dar cobertura a las mas grandes estructuras existentes. Cuando se incorporen nuevos lentes al sistema se debe tener en cuenta la aberración que éstas producen sobre la imagen y la forma de contrarrestarlas en el desarrollo del mismo. Por último, se debe llevar a cabo un proceso de simplificación del diseño electrónico para optimizar recursos, retirar los dispositivos de la tarjeta que sean innecesarios y tratar de generar una tarjeta propietaria, compacta y modular que contenga todo el sistema.

Con los datos obtenidos en las pruebas iniciales se puede hacer un proceso de síntesis de algoritmos y sintonía procurando reducir la carga computacional, mejorando la sensibilidad a fallos e incorporando otras técnicas de medición de traslación que respalden los métodos implementados hasta el momento. A futuro, se requiere que se hagan ajustes en los algoritmos para que incluyan una etapa de calibración automática basada en reconstrucción de imágenes, para compensar aberraciones ópticas producidas por las lentes y mejorar la precisión y exactitud del instrumento de medida. De igual forma se propone implementar el diseño del algoritmo descrito en este documento sobre un computador personal de escritorio o portátil al usar núcleos de programación de tiempo real tipo POSIX e integrándolo con la interfaz de adquisición de imágenes, de tal manera que se obtenga un paquete para hacer medidas en campo sin la necesidad de un DSP externo.

Otro posible trabajo está relacionado con las pruebas de campo. Se requiere llevar el sistema a múltiples escenarios como puentes de diferentes materiales y topologías, presas hidroeléctricas, embalses de acueductos o túneles. Queda abierta la posibilidad para que los datos obtenidos permitan adaptar el sistema a otras ramas del saber distintas a la ingeniería civil.

## BIBLIOGRAFÍA

ACUÑA, Rodrigo; CAUSADO, Jesús y TORRES, Pedro I. Sensor de fibra óptica para medición de pequeños desplazamientos basado en pérdidas por curvatura. s.l.: Revista colombiana de física, v.38, No. 2, 2006

ANGULO USATEGUI, José María e IÑIGO MADRIGAL, Rafael. Visión Artificial por Computador: Fundamentos, sistemas y aplicaciones en la Industria y la Robótica. Editorial Paraninfo. Madrid, España. 1986. ISBN: 84-283-1446-2. p.19, 190

BATCHELOR, Bruce G y WHELAN, Paul F. Intelligent Vision Systems for Industry. Reino Unido e Irlanda. 2002. p. 33, 44, 224.

CARRIÓN VIRAMONTES, Francisco Javier *et al.* La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes. Publicación Técnica No. 231. Sanfandila, Qro: Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte, 2003.

CARRIÓN VIRAMONTES, Francisco Javier; HERNÁNDEZ RIVERA, Jaime y ACOSTA ESQUEDA, Miguel Antonio. Estudios de corrosión en puentes de concreto pre-esforzado. Publicación técnica No. 122. Sandanfila, Qro, 1999.

CRANE, Randy. A Simplified Aproach To Image Processing, Classical and Modern Techniques In C. Hewlett Packard Company. Prentice Hall. Uper Saddle River, New Jersey. 1992. p. 27.

DI ZENZO, S; CINQUE, L; LEVIALDI, S. Run-based algorithms for binary image analysis and processing. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol 18, No 1. Enero de 1996. p. 83 – 88

ECHEVERRÍA TORIZ, Belem y OCHOA FRANCO, Luís. ¿Sabías que a través de la vibración del medio ambiente se puede saber si un puente está dañado o no? s. l.: Carisma de la Ciencia, 2006.

ELETTORAVA IBÉRICA a. Documentación Técnica: Funcionamiento de una regla óptica láser basada en la tecnología LDDM [en línea]. 1998 [citado 26 de Octubre de 2006]. Disponible en Internet: <http://www.elettrorava.es/espanol/docum/laser/secc-2.htm>

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_ b: Introducción [en línea]. 1998 [citado 26 de Octubre de 2006]. Disponible en Internet: <http://www.elettrorava.es/espanol/docum/laser/secc-1.htm>

FUNDACIÓN OPTI y FUNDACIÓN INASMET. Materiales para el Transporte y la Energía: Tendencias tecnológicas a medio y largo plazo., FUNDACIÓN INASMET. Diciembre de 2003. Disponible en Internet: [www.madrimasd.org/materiales/Biblioteca/Materiales/Downloads\\_GetFile.aspx?id=3030](http://www.madrimasd.org/materiales/Biblioteca/Materiales/Downloads_GetFile.aspx?id=3030)

GONÁLEZ, R. C. y WOODS, R. E. Digital Image Processing 2 ed. Massachussets: Addison – Wesley. 1992

ISHIDA, Masahiro *et al.* Development of survey Method for bridge Foundations. Tsukuba, Japón. The 13th U.S. – Japan Bridge Engineering Workshop. 1997.

JÄHNE, Bernd. Digital Image Processing. 5 ed. Berlín: Springer, 2002. ISBN 3-540-67754-2. Páginas 246 y 427.

JÁUREGUI, C *et al.* Redes de difracción en fibra óptica aplicadas a la monitorización de estructuras civiles de hormigón [en línea]. s.f. [citado 4 de septiembre de 2006] Disponible en Internet: <http://www.optica.unican.es/RNO7/Contribuciones/articulospdf/Jauregui.pdf>

MARQUEZ Borbón, I *et al.* Sensor distribuido para la detección de esfuerzos de umbral mediante rejillas de bragg. Ciudad de México: Revista Mexicana de Física, diciembre de 2003.

MARULANDA, Johannio *et al.* Monitoreo de Salud Estructural de Puentes Metálicos. Santiago de Cali, Colombia. Universidad del Valle. 2001 [Citado: 4 de Septiembre de 2006]. Disponible en Internet: <http://cive.seas.wustl.edu/wusceel/quake/pdfs/Hormiguero.Cartagena.2001.pdf>

MATRIX VISION. MvBlueFox documentation. Estados Unidos: 23 de octubre de 2006.

MUÑOZ Edgar. Causas del colapso de algunos puentes en Colombia. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana. 2001

MUÑOZ, Edgar *et al.* Aplicación de los principios de confiabilidad estructural para la evaluación de un puente en acero, apoyada en monitoreo e instrumentación. 10 de marzo de 2006

\_\_\_\_\_. Seminario sobre inspección, mantenimiento y rehabilitación de puentes vehiculares y peatonales. Pontificia Universidad Javeriana, facultad de ingeniería Civil, departamento de Ingeniería Civil, septiembre 24 a octubre 11 de 2004

NISHIMURA, Akihiko y HAYA, Hiroshi. Evaluation of Bridge Piers Soundness in Japanese Railways. Tokio, Japón. Railway Technical Research Institute. 1997

NIXON Mark S y AGUADO Alberto S. Feature extraction and image processing. Oxford, Gran Bretaña, 2002. p. 13, 162, 173 – 178.

PRATT, William K. Digital Image Processing. 3 ed.: Los Altos, California: John Wiley and Sons, Inc. 2001. ISBN Texto: 0-471-37407-5; Electrónico: 0-471-22132-5. P. 404.

RIVEROS JEREZ, Carlos Alberto. Structural health monitoring methodology for simply supported bridges: numerical implementation. Revista Facultad de Ingeniería No. 39. pp. 42-55. Marzo, 2007

SEUL, Michael; O' GORMAN, Lawrence y SAMMON, Michael J. Practical Algorithms for Image Analysis. Cambridge University Press. Estados Unidos. 2000. ISBN 0 521 66065 3. p. 110.

SPECTRUM DIGITAL. TMS320C64167 DSK technical reference. Stafford: Noviembre de 2004.

TEXAS INSTRUMENTS. TMS320C6414T, TMS320C6415T, TMS320C6416T fixed-point digital signal processors. Houston: 2005.

THOMAS, Peter; GUERRERO, Patricia. Desarrollo analítico y tecnológico para la identificación de daños y su aplicación en un sistema de Monitoreo de Salud Estructural en el viaducto Pereira-Dosquebradas. s.f. [en línea]. Disponible en Internet: [http://eicg.univalle.edu.co/G-7/proyecto\\_viaducto.html](http://eicg.univalle.edu.co/G-7/proyecto_viaducto.html)

WANG, Charles. Tool path measurement. United States Patent 6498653 [en línea]. 24 Diciembre de 2002 [Citado 12 de Septiembre de 2006]. Disponible en Internet: <http://www.freepatentsonline.com/6498653.html>

WATKINS, Steve E. Smart Bridge: UMR Smart Composite Bridge [en línea]. Smart Engineering Group. 2001. Disponible en Internet: <http://campus.umn.edu/smartengineering/bridge/index.html>

YOUNG, Ian T.; Gerbrands, Jan J. y Van Vliet, Lucas J. Fundamentals of Image Processing. The Netherlands at the Delft University of Technology. Holanda, 1998. p. 73.