

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“MÉTODO PARA AUMENTAR LA RESOLUCIÓN EN UN SISTEMA DE
BARRIDO ÓPTICO PARA MONITOREO DE INTEGRIDAD
ESTRUCTURAL”**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

PRESENTA

WENDY FLORES FUENTES

DIRECTOR

DR. MOISÉS RIVAS LÓPEZ

Mexicali, B. C.

JUNIO DE 2014

RESUMEN de la tesis de Wendy Flores Fuentes, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTORA EN CIENCIAS, EN EL ÁREA DE OPTOELETRÓNICA, Mexicali, Baja California, México, Junio de 2014.

MÉTODO PARA AUMENTAR LA RESOLUCIÓN EN UN SISTEMA DE BARRIDO ÓPTICO PARA MONITOREO DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL

Resumen aprobado por:

Dr. Moisés Rivas López

La presente tesis doctoral muestra los resultados obtenidos durante el trabajo de investigación realizada en el área de optoelectrónica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California durante el periodo 2011-2014.

Como su título lo indica, esta tesis describe el desarrollo y la demostración de un nuevo método para aumentar la resolución y disminuir el error en mediciones de posición, realizadas con un sistema de barrido óptico (SBO). Mediciones precisas de ángulos planos espaciales son realizadas, tomando la lectura en el centro energético de la señal generada por una fuente emisora de luz, colocada en una estructura bajo estudio. Por medio de un algoritmo analógico y digital, que calcula el centro energético de la función generada durante el barrido óptico. Sin embargo, estos sistemas de barrido óptico usualmente presentan un comportamiento de variación no lineal en sus mediciones y normalmente estas variaciones dependen de la posición en la que son colocadas las fuentes de luz en las estructuras monitoreadas y de la velocidad del barrido.

Con el propósito de mejorar la resolución del SBO, se modificó la velocidad del barrido y se utilizaron técnicas de aprendizaje automático, también conocidas como algoritmos de inteligencia artificial, para estimar o predecir errores de medición, con el propósito de ajustar esta variación no lineal que se presenta en las mediciones.

Simulaciones y pruebas experimentales fueron realizadas para desarrollar los métodos de detección del centro energético de la señal optoelectrónica generada por el sistema de barrido óptico, al monitorear fuentes de luz montadas en una mesa óptica, simulando su montaje sobre una estructura. Seis métodos fueron analizados para localizar el centro energético de la señal. Con el propósito de probar la efectividad de los métodos, una base de datos fue construida para cada uno de los seis métodos de localización del centro energético para entrenar y probar siete algoritmos de inteligencia artificial.

En este contexto, la presente tesis ha sido estructurada en nueve capítulos, que permiten dar un seguimiento detallado al desarrollo del proyecto. En el capítulo uno se presenta un panorama general del proyecto y la estructuración del presente documento. En el Capítulo dos se define el propósito del proyecto y se presenta el planteamiento del problema, así como la justificación, objetivos y metodología para el desarrollo del mismo. Del capítulo tres al siete, se presenta el marco teórico, que comprende los conceptos básicos relacionados con los sistemas de barrido óptico y el estado del arte, incluyendo los métodos más utilizados recientemente para detectar el centro energético de la señal y las técnicas de inteligencia artificial. La experimentación y el análisis de resultados se presentan en el capítulo ocho, para finalmente presentar las conclusiones en el capítulo nueve.

Por último, se encuentran las referencias, y se anexan las copias de publicaciones realizadas.

ABSTRACT of the thesis of Wendy Flores Fuentes, presented as partial requirement for obtaining the degree of DOCTOR IN SCIENCE IN THE AREA OF OPTOELECTRONICS. Mexicali, Baja California, México, June 2014.

Abstract approved by:

Dr. Moisés Rivas López

The present Ph.D. thesis shows the results obtained during the research work done in the area of optoelectronics Engineering Institute of the Autonomous University of Baja California during the period 2011-2014.

As its title indicates, this thesis describes the development and demonstration of a new method to increase the resolution and reduce the error in position measurements, made with an optical scan system (OSS).

Precise angle measurements are performed spatial planes, taking the measurement on the energy center of the signal generated by a light emitting source, placed in a structure under study. By means of an analog and digital algorithm that calculates the center of the energy generated during the optical scanning. However, these optical scanning systems usually exhibit nonlinear behavior of variation in their measurements and normally these variations depend on the position in which are placed light sources in the structures monitored and the speed of the scanning.

In order to improve the resolution of OSS, the scan rate was modified and machine learning techniques were used, also known as artificial intelligence algorithms, to estimate or predict measurement errors, with the purpose to adjust this nonlinear variation presented in the measurements.

Simulations and experimental tests were conducted to develop methods for detection of the energy center of the optoelectronic signal generated by the optical scanning system, the monitor light sources mounted on an optical table, simulating its mounting on a structure. Six methods were analyzed to locate the energy center of the signal. In order to test the effectiveness of the methods, a database was constructed for each of the six methods to locate the energy center to train and test seven artificial intelligence algorithms.

In this context, this thesis is structured into nine chapters, which allow a detailed monitoring project development. In chapter one an overview of the design and structure of this document is presented. In Chapter Two the purpose of the project is defined and the problem statement is presented, and the rationale, objectives and methodology for the development. In chapter 3 to 7, the theoretical framework, which includes the basic concepts of optical scanning systems and state of the art including the methods used recently to detect the energy center of the signal and artificial intelligence techniques, is presented. Experimentation and analysis results are presented in chapter eight, and finally present the conclusions in chapter nine.

Finally, references, and copies of publications are appended.

ÍNDICE

Índice de Páginas

RESUMEN	1
ÍNDICE	3
Índice de Páginas.....	3
Índice de Figuras y Tablas.....	6
CAPÍTULO I	8
1. Introducción.....	8
CAPÍTULO II	11
2. Propósito de la Investigación.....	11
2.1. Planteamiento del Problema.....	11
2.2. Justificación y uso de los Resultados.....	12
2.3. Hipótesis.....	14
2.4. Objetivos Generales y Específicos.....	15
2.4.1. Objetivos Generales.....	15
2.4.2. Objetivos Específicos.....	16
2.5. Metodología.....	17
CAPÍTULO III	19
3. Monitoreo de Integridad Estructural.....	19
3.1 Sistemas de monitoreo de estructuras.....	21
3.1.1. Sistemas basados en la medición de la frecuencia de vibración de la estructura.....	21
3.1.2. Sistemas basados en fibras ópticas.....	23
3.1.3. Sistemas basados en redes a base de sensores inalámbricos.....	24
3.1.4. Sistemas basados en cámaras de video.....	25
3.1.5. Sistemas basados en métodos topográficos y geodésicos.....	26
3.1.6. Sistemas basados en barrido óptico.....	27
CAPÍTULO IV	28
4. Sistemas de Barrido Óptico.....	28
4.1. Sistemas de barrido basados en el principio laser.....	30
4.1.1. Sistemas de barrido para medición tridimensional (3D) con láser.....	30
4.1.2. Sistema de barrido laser para caracterización dinámica y medición de desplazamiento de estructuras civiles.....	33
4.1.3. Sistema de barrido para tres dimensiones con vibrómetro láser.....	34

4.2.	Sistemas de barrido basados en el principio de triangulación.....	35
4.3.	Sistemas de barrido basados en espejos rotatorios.....	36
4.3.1.	Sistema de barrido basado en espejos poligonales.....	38
4.3.2.	Sistema de barrido basado en espejo piramidal y facetas prismáticas.....	40
4.3.3.	Sistema de barrido basado en holografía.....	40
4.3.4.	Sistema de barrido basado en galvanómetro y resonancia.....	40
4.3.5.	Sistema de barrido basado en espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación.....	41
CAPÍTULO V.....		42
5.	Resolución de Sistemas de Barrido Óptico.....	42
5.1.	Resolución de sistemas de barrido óptico para mediciones a distancia (Remote Sensing).....	42
5.1.1.	Sistemas pasivos con barrido angular	43
5.1.2.	Sistemas pasivos con barrido angular con espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación.....	46
5.1.2.1	Poder de resolución.....	48
CAPÍTULO VI.....		50
6.	Centro Energético de una Señal.....	50
6.1.	Aplicaciones del centro energético de una señal.....	51
6.1.1.	Centroide de un espectro en señal de audio.....	51
6.1.2.	Calculo de centroides locales en el procesamiento de señales ruidosas.....	52
6.1.3.	Triangulación de Delaunay.....	53
6.1.4.	Calculo de posición de un sensor en red inalámbrica por medio del centroide de un cinturón circular.....	54
6.1.5.	Detección acústica.....	54
6.1.6.	Detecciones biométricas de parámetros en señales de QRS.....	55
6.1.7.	Detección de posición con detectores ópticos.....	56
6.2.	Métodos para encontrar el centro energético de una señal optoelectrónica.....	58
6.2.1.	Analog saturation and integration (saturación e integración de señal analógica).....	59
6.2.2.	Geometric centroid (centroide geométrico).....	64
6.2.3.	Power spectrum centroid (centroide del espectro de potencia).....	68
6.2.4.	Rising edge (flanco de subida).....	72
6.2.5.	Peak detection (detección de picos).....	72
6.2.6.	Digital saturation and integration (versión digital de saturación e integración).....	73
CAPÍTULO VII.....		74
7.	Algoritmos de Inteligencia Artificial.....	74
7.1.	Neuronal Networks (NN).....	75
7.2.	Support Vector Machine Regression (SVMR).....	77
7.3.	Principal Components Regression (PCR).....	78
7.4.	Partial Least Squares Regression (PLSR).....	78

7.5.	Ridge Regression (RR).....	79
7.6.	Least absolute shrinkage and selection operator (LASSO).....	79
7.7.	Generalized Linear Models Fitting (GLMFIT).....	79
CAPÍTULO VIII		80
8.	Desarrollo Experimental y Resultados.....	80
8.1.	Desarrollo de sistema de barrido basado en un espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación.....	80
8.2.	Selección del método para detectar el centro energético de la señal.....	84
8.3.	Selección del método de inteligencia artificial para ajuste de error de medición.....	94
8.4.	Análisis de aumento de resolución del sistema de barrido basado en espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación.....	100
CAPÍTULO IX		102
9.	Conclusiones.....	102
LISTA DE PUBLICACIONES		103
REFERENCIAS		105
ANEXOS		109

Índice de Figuras y Tablas

<i>Figura 1</i>	Efectos de las Condiciones Ambientales sobre Estructuras.....	20
<i>Figura 2</i>	Rol del SHM en las estructuras.....	20
<i>Figura 3</i>	Sistema basado en Acelerómetros.....	22
<i>Figura 4</i>	Configuración básica de un sistema con sensor óptico distribuido.....	23
<i>Figura 5</i>	Sistema de monitoreo en base a sensores inalámbricos.....	25
<i>Figura 6</i>	Sistema de estereovisión.....	25
<i>Figura 7</i>	Principio de funcionamiento del sistema GPS.....	27
<i>Figura 8</i>	Sistema de barrido para medición tridimensional (3D) con láser.....	31
<i>Figura 9</i>	Sistema de barrido laser para caracterización dinámica y medición de desplazamiento de estructuras.....	34
<i>Figura 10</i>	Sistema de barrido para tres dimensiones con vibrómetro láser.....	35
<i>Figura 11</i>	Principio de triangulación.....	36
<i>Figura 12</i>	Concepto de técnica basada en Imágenes Hiperespectrales.....	38
<i>Figura 13</i>	Sistema de barrido con espejo poligonal.....	39
<i>Figura 14</i>	Sistema de barrido basado en galvanómetro y resonancia.....	41
<i>Figura 15</i>	Sistema de barrido con espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación.....	41
<i>Figura 16</i>	Velocidad de Barrido contra muestras capturadas.....	47
<i>Figura 17</i>	Ilustración de efecto de Airy en dos fuentes de luz a distintas distancias de acercamiento.....	49
<i>Figura 18</i>	Representaciones del centro energético de una señal optoelectrónica.....	50
<i>Figura 19</i>	Secuencia de centroides locales.....	53
<i>Figura 20</i>	Triangulación de Delaunay.....	54
<i>Figura 21</i>	Distribución ideal de una mancha de luz en un detector óptico.....	56
<i>Figura 22</i>	Distribución real de un fotón sobre un detector influenciada por distintos patrones de difracción.....	57
<i>Figura 23</i>	Efecto Airy.....	57
<i>Figura 24</i>	Señal optoelectrónica tipo Gaussiana ideal (simétrica).....	58
<i>Figura 25</i>	Señales tipo Gaussiana con deformaciones y asimetría.....	59
<i>Figura 26</i>	Pasos para la detección del centro energético en el método de saturación e integración de la señal analógica.....	59
<i>Figura 27</i>	Circuito para procesamiento analógico de señal optoelectrónica.....	60
<i>Figura 28</i>	Detector de Nivel.....	61
<i>Figura 29</i>	Integrador.....	62
<i>Figura 30</i>	Detector de cruce por cero.....	62
<i>Figura 31</i>	Circuito CR y diodo.....	63
<i>Figura 32</i>	Detección del centro energético por el método de saturación e integración de la señal analógica.....	64
<i>Figura 33</i>	Procesamiento digital para la detección del centro energético de una señal por el centroide geométrico.....	65
<i>Figura 34</i>	Centroide Geométrico para una línea, área y volumen.....	66
<i>Figura 35</i>	Coordenadas del Centroide Geométrico.....	67
<i>Figura 36</i>	Definición de la función.....	68
<i>Figura 37</i>	Procesamiento digital para la detección del centro energético de una señal por el centroide del espectro de frecuencia.....	69
<i>Figura 38</i>	Centroide del espectro de potencia.....	69
<i>Figura 39</i>	Métodos de detección del centro energético de una señal optoelectrónica.....	73
<i>Figura 40</i>	Error de medición por posición.....	74
<i>Figura 41</i>	Técnica “k-fold cross validation” (validación cruzada de k-dobles).....	75
<i>Figura 42</i>	Sistema de barrido con espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación.....	81
<i>Figura 43</i>	Principio de la formación de la señal optoelectrónica durante un ciclo de barrido.....	82
<i>Figura 44</i>	Diagrama de tiempo en la adquisición de datos.....	83
<i>Figura 45</i>	Señal optoelectrónica de fuentes emisoras de luz colocadas a distintos ángulos.....	84
<i>Figura 46</i>	Circuito de control DIFERENCIADOR.....	85
<i>Figura 47</i>	Circuito de control PROCESAMIENTO ANALOGICO preliminar.....	86

<i>Figura 48</i>	Resultados de etapa inicial del centro energético de una señal.....	87
<i>Figura 49</i>	Control del motor.....	88
<i>Figura 50</i>	Control de revoluciones del motor.....	89
<i>Figura 51</i>	Captura (adquisición) de señal.....	89
<i>Figura 52</i>	Representación de mediciones por ángulo y distancia (Ángulo de barrido cada 5° y distancia de barrido cada 1 cm).....	90
<i>Figura 53</i>	Comparación de los métodos de detección del centro energético por medio de mapa de colores (Cualitativo).....	92
<i>Figura 54</i>	Distribución de frecuencia del error de los métodos de detección del centro energético...	93
<i>Figura 55</i>	Comparación de mediciones iniciales y finales por medio del mapa de colores.....	100
<i>Tabla 1</i>	Velocidad de Barrido contra Muestras Capturadas.....	47
<i>Tabla 2</i>	Comparación de los métodos de detección del centro energético por medio del MSE.....	91
<i>Tabla 3</i>	Comparación de los métodos de detección del centro energético por medio del parámetro de Correlación R.....	91
<i>Tabla 4</i>	Comparación de los métodos de detección del centro energético por medio de mapa de colores (Cuantitativo).....	93
<i>Tabla 5</i>	Comparación de los métodos de detección del centro energético por medio de mediciones de parámetros tendencia central y dispersión.....	94
<i>Tabla 6</i>	Comparación de los métodos de detección del centro energético por medio de Wilcoxon Signed Rank Test.....	94
<i>Tabla 7</i>	Parámetros de entrenamiento para algoritmos de inteligencia artificial.....	96
<i>Tabla 8</i>	Evaluación de métodos de inteligencia artificial por medio del MSE.....	97
<i>Tabla 9</i>	Evaluación de métodos de inteligencia artificial por medio del parámetro de Correlación R..	97
<i>Tabla 10</i>	Evaluación de métodos de inteligencia artificial por medio de Wilcoxon Signed Rank Test (WSRT).....	98
<i>Tabla 11</i>	Comparación de los métodos de detección del centro energético (con ajuste de error) por medio de Wilcoxon Signed Rank Test.....	99
<i>Tabla 12</i>	Valores de $\Delta\theta$ a través del barrido realizado en mesa óptica durante el desarrollo experimental.....	101
<i>Tabla 13</i>	Valores de Resolución (N) a través del barrido realizado en mesa óptica durante el desarrollo experimental.....	101

CAPÍTULO I

1. Introducción

El Monitoreo Integral de Estructural o “*Structural Health Monitoring (SHM)*” como es actualmente conocido, es una nueva tendencia en la búsqueda de métodos y desarrollo de estrategias para determinar la integridad de estructuras. El desarrollo del SHM se ha convertido cada vez más en una necesidad importante para la prevención de daños indeseables en las diferentes obras de infraestructura pública, industrial y de servicios, ya que este se traduce en daños económicos y sobre todo en daños en la integridad física de las personas que habitan y/o utilizan dicha infraestructura.

En esta tesis se presenta un nuevo método para aumentar la resolución y disminuir el error en mediciones de posición, realizadas con un sistema de barrido óptico (SBO). Mediciones precisas de ángulos planos espaciales son realizadas, tomando la lectura en el centro energético de la señal generada por una fuente emisora de luz, colocada en una estructura bajo estudio. Por medio de un algoritmo analógico y digital, que calcula el centroide energético de la función generada durante el barrido óptico. Sin embargo, estos sistemas de barrido óptico usualmente presentan un comportamiento de variación no lineal en sus mediciones y normalmente estas variaciones dependen de la posición en la que son colocadas las fuentes de luz en las estructuras monitoreadas y de la velocidad del barrido.

Con el propósito de mejorar la resolución del SBO, se modificó la velocidad del barrido y se utilizaron técnicas de aprendizaje automático, también conocidas como algoritmos de inteligencia artificial, para estimar o predecir errores de medición, con el propósito de ajustar esta variación no lineal que se presenta en las mediciones.

Simulaciones y pruebas experimentales fueron realizadas para desarrollar los métodos de detección del centro energético de la señal optoelectrónica generada por el sistema de barrido óptico, al monitorear fuentes de luz montadas en una mesa óptica, simulando su montaje sobre una estructura. Seis métodos fueron analizados para localizar el centro energético de la señal, encontrándose entre ellos un método nuevo de procesamiento analógico de

la señal optoelectrónica (Analog Saturation and Integration) y cinco métodos existentes de procesamiento digital (Geometric Centroid, Power Spectrum Centroid, Rising Edge, Peak Detection, Digital Saturation and Integration).

Con el propósito de probar la efectividad de los métodos, una base de datos fue construida con aproximadamente seis mil registros (6000 localizaciones distintas de la fuente de luz sobre la mesa óptica), para cada uno de los seis métodos de localización del centro energético. Cada base de datos conteniendo tres atributos (Angulo, Distancia y Frecuencia de Barrido) y un objetivo (Error de medición) para entrenar y probar siete algoritmos de inteligencia artificial (Neuronal Networks {NN}, Support Vector Machine Regression {SVMR}, Partial Least Squares Regression {PLSR}, Principal Components Regression {PCR}, Least absolute shrinkage and selection operator {LASSO}, Ridge Regression {RR}, Generalized Linear Models Fitting {GLMFIT}).

Los siete algoritmos de inteligencia artificial fueron entrenados y probados con cada una de las seis bases de datos provenientes de los seis métodos para detección del centro energético de una señal optoelectrónica generada por el sistema de barrido óptico, por medio de varios experimentos computacionales en la búsqueda de los mejores parámetros y partición de datos (entrenamiento-prueba) para cada uno de los algoritmos de inteligencia artificial.

Finalmente las mediciones de los seis métodos para localizar el centro energético de la señal optoelectrónica fueron corregidas con resultados exitosos agregándoles el error predicho por el algoritmo de inteligencia artificial a las mediciones realizadas. Demostrando de esta manera la efectividad en el método propuesto de obtención del centro energético de la señal optoelectrónica y su mejora al realizar el ajuste de medición por medio de la aproximación del error a través de un algoritmo de inteligencia artificial. Cabe mencionar que los seis métodos para encontrar el centro energético ofrecieron resultados aceptables, sin embargo para seleccionar el mejor de ellos fue necesario evaluarlos por medio de Wilcoxon Signed Rank Test debido a la distribución no paramétrica de los datos.

En este contexto, la presente tesis ha sido estructurada en nueve capítulos, que permiten dar un seguimiento detallado al desarrollo del proyecto.

En el capítulo uno se presenta un panorama general del proyecto y la estructuración del presente documento.

En el Capítulo dos se define el propósito del proyecto y se presenta el planteamiento del problema, así como la justificación, objetivos y metodología para el desarrollo del mismo.

Del capítulo tres al siete, se presenta el marco teórico, que comprende los conceptos básicos relacionados con los sistemas de barrido óptico y el estado del arte, incluyendo los métodos más utilizados recientemente para detectar el centro energético de la señal y las técnicas de inteligencia artificial.

La experimentación y el análisis de resultados se presentan en el capítulo ocho, para finalmente presentar las conclusiones en el capítulo nueve.

CAPÍTULO II

2. Propósito de la Investigación

Desarrollar un método que permita aumentar la resolución en sistemas de barrido óptico, para tareas de monitoreo de integridad estructural, con el propósito de detectar daños en la infraestructura civil, mecánica, minera y aeroespacial, entre otras. Debido a que diferentes tipos de daños en una estructura producen deformaciones, que de no ser detectadas a tiempo, pueden provocar el colapso de las mismas.

2.1. Planteamiento del Problema

Actualmente los sistemas de barrido óptico tienen diversas aplicaciones y en cada aplicación se requiere de una resolución y exactitud determinada para medir los cambios mínimos que puede tener el objeto bajo observación (Rivas López et al 2010).

Existen algunos métodos y sistemas de barrido que su principio de operación se basa en un espejo rotatorio poligonal, configurado con varias superficies de reflexión equilaterales y equidistantes con respecto al eje de rotación, de tal forma que al girar el espejo, el haz de luz incidente es reflejado secuencialmente por cada una de las superficies de reflexión para ser captado por algún elemento óptico (Harris D. et al 1995). En este tipo de sistemas de barrido la resolución está asociada a la dimensión de las superficies de reflexión y a la velocidad de barrido, con el error asociado a una medición discreta (Boardman et al 1995).

Recientemente, en el laboratorio de opto electrónica y mediciones automáticas del Instituto de Ingeniería se desarrolló un método para tareas de SHM cuyo principio de operación se basa en un espejo cilíndrico con una sola superficie de reflexión a 45° . En experimentaciones preliminares utilizando este método, se encontraron resultados satisfactorios y se observó que para tareas de SHM, es posible aumentar la resolución disminuyendo la velocidad de

barrido, pero esto da origen a otras fuentes de error, que pueden ser minimizadas, utilizando un método de medición más apropiado (Sergiyenko et al 2009).

Entre las fuentes de error se encuentran, la excentricidad del motor al disminuir la velocidad del barrido, perturbaciones ocasionadas por otras fuentes externas, como la luz solar, que pueden interferir con longitud de onda la fuente emisora, los fenómenos de reflexión, difracción, absorción y refracción (Fischer et al 2000), ocasionando que la señal gaussiana generada por el sensor no sea perfecta, lo que se traduce en un problema al momento de definir el punto en el que se realizaran las mediciones respectivas, afectando la resolución, incertidumbre y exactitud de las mediciones. En el presente proyecto se pretendió estudiar diferentes métodos para aumentar la resolución del barrido minimizando la incertidumbre y las posibles fuentes de error y proponer un nuevo método y probarlo mediante un prototipo experimental.

2.2. Justificación y Uso de Resultados

Las tareas de monitoreo para medición de deformaciones de grandes estructuras requieren de la adquisición de información rápida, exacta, precisa y a bajo costo, existen sistemas basados en cámaras de video para realizar estas tareas, pero estos se vuelven ineficientes por el retraso temporal en el procesamiento de la imagen, aunado a la dificultad de captación de los datos en condiciones adversas, como escasa iluminación, polvo, lluvia, etc., en estos casos resulta ser más apropiado utilizar sistemas de barrido óptico (López et al 2008).

Los sistemas de barrido óptico permiten obtener cientos y hasta miles de mediciones de uno o varios puntos, en cortos periodos de tiempo con altas resoluciones del orden de milímetros dependiendo del sistema de barrido y de la distancia a la estructura. Entre las ventajas de estos sistemas de barrido se encuentran la rápida reducción de los tiempos de observación de los datos, bajo costo y rápida reproducción de la estructura, posibilidad de examinar estructuras y áreas remotas, evitando así problemas de accesibilidad y peligrosidad en la captura de la información; Posibilidad de barrer estructuras complejas, donde las técnicas tradicionales no son capaces de generar una información continua tan precisa (Ruiz 2010).

Los sistemas de barrido óptico pueden utilizar fuentes emisoras de luz coherente, como el láser o fuentes de luz no coherente, como el bulbo utilizado en los carros de vehículos. En el caso del láser la captura de datos de campo son en gran medida independientes de la iluminación, por lo que se puede explorar de día y de noche. Sin embargo, existen algunas desventajas como lo es el costo inicial de la inversión, la peligrosidad debido a su alta potencia energética, además de que no pueden penetrar la lluvia y la niebla densa y que las corrientes de aire caliente que suben a las estructuras interfieren en los rayos láser; y es difícil alinear correctamente los emisores y receptores (Grum 2009).

Los sistemas de barrido, utilizan espejos poligonales, espejos planos o espejos prismáticos, como unidad de desviación de un rayo láser o el haz de luz (Duma 2007). Un elemento que puede limitar la resolución del sistema es precisamente el espejo utilizado como unidad de desviación del haz, el mismo haz de luz dependiendo de su longitud de onda, ya que la frecuencia de la señal es inversamente proporcional a la longitud de onda y el sensor receptor de luz tiene un cierto rango de recepción de frecuencias. En los sistemas con espejos poligonales giratorios la resolución del sistema está asociada a la dimensión de las superficies de reflexión y a la velocidad de barrido, tienen un ciclo de trabajo mayor que los sistemas con espejos planos (Duma 2007), y presentan errores de seguimiento del barrido (tracking error).

Otro elemento que limita la resolución de los sistemas de barrido es el sensor que capta la luz para convertirla a señales eléctricas que posteriormente serán procesadas. Así por ejemplo en los sensores CMOS o los CCD la resolución se asocia a la superficie de captación y al número de píxeles respectivo y aunque tienen la ventaja de facilitar el procesamiento digital para reproducir una imagen, también tienen la desventaja de no funcionar adecuadamente a largas distancias y en condiciones adversas, en tanto que en los sensores analógicos la resolución se asocia al mínimo cambio en la señal recibida que puede observarse en la señal eléctrica de salida y permiten dar un seguimiento continuo a la luz captada.

En este contexto, en el Instituto de Ingeniería se ha venido trabajando en un método para aumentar la resolución en sistemas de barrido óptico para tareas de monitoreo de integridad estructural, basados en el supuesto de que a baja velocidad se puede aumentar la resolución de barrido tomando la medición cuando el sistema encuentra el

centro energético de la señal emitida por la fuente emisora de luz, permitiendo encontrar la velocidad óptima de barrido, para obtener la máxima resolución.

Lo anterior justifica la presente experimentación realizada para desarrollar un nuevo método que permite aumentar la resolución, y disminuir la incertidumbre ya que estos son parámetro indispensable al juzgar la confiabilidad de los resultados de una medición.

2.3. Hipótesis

Estudios recientes muestran que algunos de los sistemas de barrido óptico más utilizados actualmente, tienen una unidad de desviación del haz de luz para realizar el barrido, basada en espejos poligonales giratorios, espejos planos o espejos prismáticos y su sensor de captación que pueden ser un charge-coupled device (CCD), complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) o fotodiodos, que aunado a los componentes mecánicos, los circuitos de control, algoritmos matemáticos para el procesamiento de señales y el método de barrido utilizado (activo o pasivo), definen la resolución y la exactitud del sistema.

La presente investigación se basó en la premisa de que la distribución espacial de la luz emitida por una fuente de luz no coherente, al pasar por una apertura circular, produce un efecto similar al disco de Airy, y que la señal optoelectrónica ideal producida por el sensor de captación después del barrido genera una señal de forma tipo gaussiana.

Sin embargo, en la práctica las señales generadas varían su forma debido a fuentes de ruido externas, debido a factores en el mecanismo de barrido y debido a fenómenos ópticos de reflexión, refracción, y difracción, etc.

Entonces la presente investigación planteo la hipótesis de que al disminuir la velocidad del barrido y encontrando el centro energético de la señal emitida por la fuente emisora, se podría aumentar la resolución de un sistema de barrido óptico.

Para contrastar esta hipótesis se propuso utilizar diferentes métodos y comparar los resultados, estos métodos se basaron en procesamiento analógico y procesamiento digital de la señal optoelectrónica proveída por el sistema de barrido óptico.

Inicialmente se consideraron las siguientes variables para el desarrollo de la investigación:

- Precisión de la detección del centro energético de la señal.
- Velocidad de Barrido
- Número de elementos fotosensibles, longitud de onda y/o área del sensor de detección
- Anchura máxima de exploración (apertura de barrido)
- Distancia entre las fuentes de luz emisoras y el sensor de detección.
- Longitud de onda de la fuente de luz emisora.
- Distancia entre dos sistemas de barrido (midiendo en diferente dirección).
- Precisión en la alineación de dos sistemas de barrido (midiendo en diferente dirección)
- Precisión en la distancia a la que se colocarán las fuentes de luz emisoras para no crear interferencias entre ellas.

Todas estas variables afectan la resolución, exactitud e incertidumbre del sistema, sin embargo, el énfasis de esta investigación se enfocó en la búsqueda del centro energético de la señal.

2.4. Objetivos Generales y Específicos

2.4.1. Objetivos Generales

Realizar un análisis comparativo de los distintos sistemas de monitoreo de estructuras y en específico de sistemas de barrido óptico más utilizados actualmente en tareas de SHM, sus métodos de medición, las consideraciones de su diseño y proponer un nuevo método para aumentar la resolución de las mediciones, principalmente en la medición de coordenadas y desplazamiento de puntos ubicados en las estructuras bajo observación.

Desarrollar un método para aumentar la resolución en sistemas de barrido óptico, de baja velocidad, basado en la búsqueda del centro energético de la señal optoelectrónica captada por el sensor fotodiodo emitida por la fuente de luz emisora utilizada y diseñar el prototipo experimental para la prueba del mismo. Específicamente el objetivo de

la investigación fue encontrar el centro energético de la señal optoelectrónica de las mediciones realizadas por el sensor receptor del haz de luz para disminuir la incertidumbre y aumentar la exactitud de la medición. Desde el inicio de la presente investigación se tuvo por objetivo realizar el siguiente procedimiento para comparar los resultados de los siguientes métodos:

- Adquisición de señal analógica (optoelectrónica) y procesamiento de la señal con circuitos de control para encontrar el centro energético de la señal emitida por la fuente emisora de luz (Signal Energy Centre {SEC}).
- Adquisición de la señal analógica y digitalización de la señal para procesarla con algoritmos matemáticos para encontrar el centro energético de la señal emitida por la fuente emisora de luz (Signal Energy Centre {SEC}).

2.4.2. Objetivos Específicos

- Definir los sistemas de barrido óptico existentes y su respectiva resolución e incertidumbre.
- Identificar nuevas alternativas de métodos para reducir la incertidumbre y aumentar la resolución en sistemas de barrido óptico, mediante un análisis comparativo de los métodos existentes.
- Desarrollar métodos teóricos para disminuir la incertidumbre y aumentar la resolución en sistemas de barrido óptico de baja velocidad basado en la búsqueda del centro energético de la señal optoelectrónica obtenida por el fotodiodo al realizar el barrido de la fuente de luz emisora.
- Probar los modelos por medio de simulación para evaluar los métodos propuestos, así mismo obtener información que pueda ser almacenada y analizada matemáticamente.
- Elaborar un prototipo que no necesite cambiar las propiedades de la estructura que se monitoreara.
- Realizar un diseño mecánico-electrónico de un prototipo experimental y un circuito acondicionador de señal.
- Elaborar un análisis metroológico teórico del sistema
- Documentar la elaboración de la construcción de un prototipo experimental para validar los métodos propuestos.
- Simular medición de desplazamiento y deformación de estructuras utilizando un sistema de barrido óptico con los distintos métodos propuestos.

2.5. Metodología

La metodología propuesta para la presente investigación contemplo dos perspectivas, la primera se relaciona con el desarrollo de métodos teóricos y la segunda con el diseño de un prototipo para evaluar estos métodos. Esta metodología se conformó de las siguientes etapas:

- Revisión del estado del arte sobre la resolución de los sistemas de barrido óptico más utilizados actualmente: Esta primera etapa permitió hacer una recopilación de información sobre los sistemas de barrido óptico más utilizados en la actualidad, para identificar nuevas alternativas de métodos para aumentar la resolución en sistemas de baja velocidad y reducción de incertidumbre.
- Diseño de métodos teóricos basados en la búsqueda del centro energético de la señal optoelectrónica obtenida por el sistema de barrido óptico de la fuente de luz emisora: Esta etapa consiste en el desarrollo de métodos para aumentar la resolución del sistema de barrido soportado en la búsqueda del centro energético de la señal emitida por la fuente emisora de luz.
- Simulación del método propuesto: Esta etapa consistió en la evaluación de los métodos propuestos mediante un modelo de simulación.
- Búsqueda del centro energético utilizando procesamiento digital de señales (por medio de algoritmos matemáticos): En esta etapa se propuso digitalizar la señal generada por el sensor y encontrar el centro de la señal con algoritmos matemáticos basados en métodos para encontrar el centro geométrico y/o centroides de figuras irregulares.
- Búsqueda del centro energético utilizando procesamiento analógico de señales: Utilizando circuitería electrónica para por medio del procesamiento analógico encontrar el centro energético de la señal.

- Prueba de los métodos utilizados variando diferentes parámetros, como velocidad de barrido, longitud de onda de la fuente emisora y distancia entre dos fuentes colocadas al mismo tiempo. Una vez desarrollados los algoritmos para encontrar el centro energético, se probarían variando diferentes parámetros para comparar los resultados de la medición.
- Evaluación metrológica y estadística de los métodos: En esta etapa se evaluó la resolución, la exactitud y precisión de los métodos utilizados, a través del análisis y ajuste del error de las mediciones.
- Análisis de resultados y conclusiones: En esta última etapa se analizaron los resultados obtenidos y se emitieron las conclusiones y recomendaciones de la investigación.
- Publicación de resultados: Durante el desarrollo del proyecto se presentarán avances del mismo y se publicaron en eventos académicos y revistas arbitradas e indizadas.

CAPÍTULO III

3. Monitoreo de Integridad Estructural (Structural Health Monitoring {SHM})

El monitoreo de integridad de estructuras es una tecnología enfocada en la adquisición de datos y el análisis de estructuras hechas por hombres, con el propósito de adquirir indicadores del estado de salud de las estructuras. La integridad de las estructuras requiere ser monitoreada a través de su tiempo de operación para detectar posibles deformaciones del diseño original. La deformación de la estructura se observa por medio de una evaluación periódica de sus coordenadas en los puntos de referencia, fijados sobre un objetivo en la estructura.

Los datos son obtenidos de sensores no-destructivos en la estructura y su análisis permite la detección de anomalías en la estructura para evaluar su salud, por medio de una comparación entre estos valores y un perfil de salud conocido. Esta tecnología es aplicada a una amplia gama de campos de la ingeniería relacionada con estructuras, tales como edificios, puentes, estadios, túneles, minas y con el diseño y desarrollo de sistemas para tareas de SHM (Rivas López et al 2010).

Durante su vida útil, las estructuras son susceptibles a experimentar deterioros y daños debido a condiciones ambientales, al envejecimiento de sus materiales y a condiciones de carga excesiva, por ejemplo corrosión, reacciones químicas, humedad, fatiga, desplazamiento de suelo y vibraciones, entre otros, produciéndose en las estructuras deformaciones, agrietamientos, desplazamientos e incluso colapsos, como se ilustra en Figura 1.

Esta tecnología SHM provee de información valiosa para evitar derrumbes, tragedias, desarrollar programas de mantenimiento preventivo a las estructuras, con el propósito de prevenir desastres y también evitar los elevados costos debido a acciones correctivas una vez sucedido un desastre.



Figura 1. Efectos de las Condiciones Ambientales sobre Estructuras

El desarrollo de estrategias para el monitoreo de la integridad estructural ha tomado mayor importancia cada vez debido a que las estructuras juegan un rol muy importante en la seguridad y la economía. De esta manera, la creciente demanda de estructuras más seguras y funcionales ha dado lugar a tareas de SHM a través de investigación y desarrollo de técnicas de adquisición de datos, análisis de datos, y definición de indicadores de la salud de las estructuras.

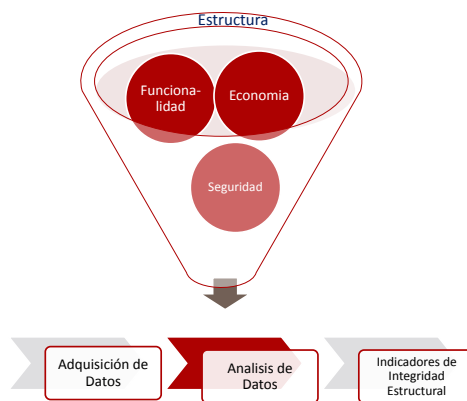


Figura 2. Rol del SHM en las estructuras

Conforme las estructuras se han fabricado más ligeras ha aumentado la necesidad de monitorear su integridad. En los últimos años, la supervisión en sitio se ha convertido en una práctica común a través de mediciones periódicas de comportamiento dinámico. Diferentes métodos han sido estudiados con el objetivo de desarrollar procedimientos de monitoreo robustos.

3.1. Sistemas de monitoreo de estructuras

Actualmente existen varios estudios que reportan los resultados de diferentes tecnologías y sistemas relacionados con las tareas de SHM, en las últimas décadas destacan los sistemas a base de fibras ópticas, redes inalámbricas, cámaras de video y recientemente, los sistemas de barrido óptico. Cada una de las tecnologías y sistemas para SHM con sus propias ventajas y desventajas que responden a muchas situaciones, por ejemplo el tipo de estructura, el número de características a ser monitoreadas, etc.

3.1.1. Sistemas basados en la medición de la frecuencia de vibración de la estructura

La medición de la frecuencia de vibración en una estructura, consiste en colocar sensores de aceleración en la estructura para registrar su comportamiento dinámico. Este método consiste en transformar la vibración debida al movimiento en una estructura en una señal de voltaje, por medio de un transductor piezoeléctrico, amplificar la señal y transferirla a un analizador dinámico. Una vez analizada y procesada la señal, esta se imprime para representar la segunda derivada en función del tiempo y el espectro de potencia en función de la frecuencia. Y la frecuencia natural puede ser obtenida. La sensibilidad al modo de frecuencia incrementa en la presencia de una grieta y decrece en su ausencia. Esto fue comprobado al suministrar movimiento a una viga sana y medir su frecuencia natural y la misma viga con una grieta suministrarle el mismo movimiento y medir el cambio en su frecuencia natural. Cuando una estructura se somete a la acción de aceleraciones (por ejemplo sísmicas), la medida de sus efectos provee información útil para estudiar y evaluar su respuesta dinámica, así como la posible evolución de su comportamiento. El procesamiento de las señales provenientes de los acelerómetros deben incluir el cálculo de distribución de energía en diferentes frecuencias y la determinación de funciones de transferencia características de la estructura; las gráficas comparativas generadas por este tipo de sistemas deben permitir observar la evolución del comportamiento de la estructura. El conocimiento de la evolución de la respuesta dinámica del inmueble permite estimar sus condiciones de seguridad.

Este método se auxilia de algoritmos de inteligencia artificial para realizar tareas de reducción de las series de datos por medio del análisis de componentes principales (Principal Component Analysis {PCSP}), el desarrollo de un modelo de datos usando datos de estructuras sin daños por medio de un algoritmo de predicción (AR, auto-regressive, ARMA, auto-regressive moving average y/o ARX auto-regressive with exogenous) y de un algoritmo de clasificación (fuzzy clustering approach) para definir si la estructura está dañada o no, siendo este último proceso lo más crítico de este método de monitoreo de estructuras debido a una incertidumbre significativa generada por errores en el modelo de datos creado con señales de aceleración seleccionadas y normalizadas de estructuras sin daños (Da Silva 2008). Entre sus ventajas se encuentran el poder conocer y analizar la respuesta dinámica de la estructura, conocer los posibles cambios en rigidez, si los daños y/o degradaciones superan la resistencia de la estructura, el registro histórico de aceleración, además de la distribución y nivel de energía asociada a cada frecuencia y conocer la función de transferencia entre dos puntos específicos (cociente de espectros entre dos puntos específicos) para comparar la evolución de la estructura (El-Kafray 2011).

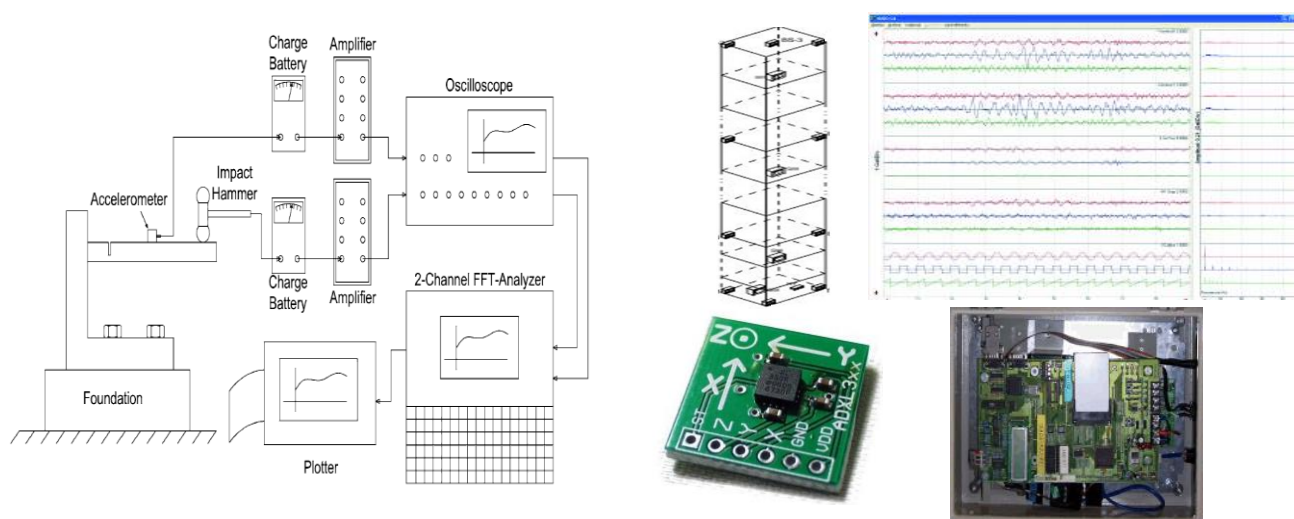


Figura 3. Sistema basado en Acelerómetros

3.1.2. Sistemas basados en fibras ópticas

Estos sistemas de monitoreo están basados en tecnologías de fibras ópticas (Werner et al 2003), operan con un mecanismo en el que un espectro de luz es transmitido a través de una fibra óptica, el cual cambia en proporción al estiramiento que sufre una fibra óptica cuando esta es sometida a una tensión, como se muestra en la Figura 4, (Kihara, et al 2002). Los sensores de fibra óptica para monitoreo de estructuras son diseñados para ser sensibles a la tensión y a la flexión y si bien es cierto que los requerimientos y los métodos de medición son diferentes en cada obra que se desea monitorear, en la actualidad muchas de las aplicaciones se basan en el interferómetro de Michelson (Lee et al 2004, Leng et al 2005, Griffin et al 2004, Player et al 2005) y el principio de luz dispersa de Brillouin. Los sistemas de barrido con sensores de fibra óptica han sido probados obteniendo resultados exitosos en la medición de deformaciones en obras civiles. Entre sus ventajas se encuentra el ser insensibles a la interferencia electromagnética, el tener transmisión segura, ya que las fibras no pierden luz y no pueden ser perturbadas, el ser livianas y de tamaño reducido, sin embargo, estos sistemas tienen como desventaja los altos costos de instalación y mantenimiento, debido a la alta fragilidad de las fibras, la necesidad de utilizar transmisores y receptores caros, los empalmes entre fibras son difíciles de realizar, lo que dificulta las reparaciones en caso de una ruptura, son incrustadas a la estructura al momento de su fabricación y sufren de deformación al momento de deformarse la estructura, cambiando las condiciones de sus parámetros de longitud de onda y demás para cálculos de posición, entre otras, por lo que resulta muy costoso utilizarlos en el monitoreo de largas longitudes, como el caso de una falla geológica o el monitoreo de una línea de transmisión.

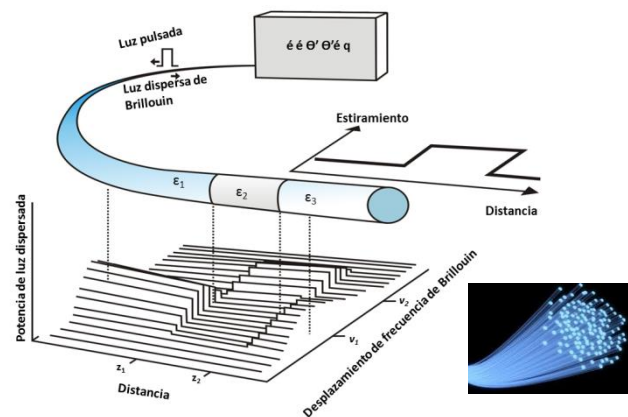


Figura 4. Configuración básica de un sistema con sensor óptico distribuido

3.1.3. Sistemas basados en redes a base de sensores inalámbricos

Estos sistemas de monitoreo se basan en instalar una malla de sensores inalámbricos como se muestra en la Figura 5, como es el caso de tecnologías “bluetooth” y radiofrecuencia, que permiten medir diferentes parámetros en una estructura, y determinar posiciones rápidamente por medio del satélite. Es un modelo muy reconocido debido a su gran aplicación en monitoreo de obras civiles principalmente en edificios, disminuyendo costos por el uso de cableados, en ocasiones cuentan con un procesador interno y sistemas micro-electromecánicos (Chintalapudi et al 2006), pero la mayoría de los sistemas disponibles o en desarrollo, tienen el inconveniente de manejar demasiado volumen de información ocasionando un déficit en el procesamiento debido a la complejidad del software, disminuyendo la velocidad de respuesta (Allen et al 2005), utiliza demasiados canales de comunicación, tiene la ventaja de trabajar con modelos de bajo consumo de energía (Metha et al 2004), lo cual a su vez se convierte en una desventaja, porque su alcance se reduce a una distancia de diez metros lo cual resulta impráctico en monitoreo de grandes objetos como puentes, minas y fallas geológicas, además sus estimaciones de posición tienen un amplio rango de error (varios metros) debido a efectos de los hemisferios, ionosfera y troposfera sobre los satélites, causando retardos, requiere de una estación de referencia que genere correcciones al rango, calculando la distancia de la estación referencia a cada satélite, no se puede usar para minas, túneles, ni lugares donde no haya buena cobertura del satélite, entre otros.



Figura 5. Sistema de monitoreo en base a sensores inalámbricos

3.1.4. Sistemas basados en cámaras de video

La base de cualquier método de cámaras, es el principio de la visión volumétrica de los seres humanos, capaces de reconstruir una imagen tridimensional (3-D) y calcular aproximadamente las distancias hasta los objetos en la escena. Esto, es en otras palabras, la estereovisión. Un sistema técnico de estereovisión es un enfoque de sistema multi-cámara en donde se considera como caso elemental un sistema de dos cámaras (García et al 2001). Si un sistema de estereovisión (Chaumette et al 2006) se utiliza, y, un punto 3-D es visible tanto en la imagen izquierda como en la derecha (ver Figura 6), es posible utilizar como características visuales un vector S que contiene los valores deseados de la escena características.

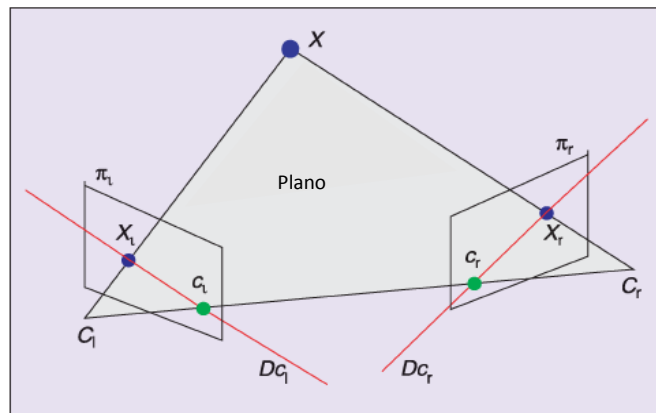


Figura 6. Sistema de estereovisión

En donde la matriz medición de la imagen da las coordenadas del punto de la imagen expresada en unidades de píxel, y el conjunto de parámetros intrínsecos de la cámara son las coordenadas del punto principal, la longitud focal, y α , la relación de las dimensiones en píxeles. Aunque estos métodos proveen gran cantidad de datos para obtener información y están siendo utilizados para el monitoreo de deformaciones geométricas (Aubert et al 2002), tienen la principal desventaja en la correspondencia de las imágenes monoculares haciendo más complejos los algoritmos para realizar estas tareas, elevando el costo de computación (Cristina et al 2007), ya que requieren de unidades de almacenaje de memoria grandes, requieren de procesamiento de la señales para analizar, y dicho procesamiento requiere que las señales sean previamente depuradas automática y manualmente, teniendo además limitaciones en condiciones de brillo, sombras, y sombreados, ya que la iluminación ambiental variable afecta la

calidad de las imágenes. Estos sistemas son más adecuados para monitoreo de imágenes u objetos con mucho movimiento.

3.1.5. Sistemas basados en métodos topográficos y geodésicos

Durante muchos años los métodos más utilizados para el monitoreo de objetos de grandes dimensiones fueron los métodos geodésicos apoyados en instrumentos como el teodolito mecánico, teodolito electrónico, distanciómetro y nivel. Con estos instrumentos el monitoreo se lleva a cabo midiendo ángulos planos en un espacio esférico dentro de un ángulo sólido $\Omega = 4\pi \text{ Sr}$, debido que se trabaja sobre la superficie de la tierra (Tyrsa et al 2004, Rivas et al 2010), considerando al ángulo sólido como la unidad de medida en un espacio tridimensional cuya magnitud estándar es el estereorradián (sr), (Emerson 2005). En este contexto el monitoreo con teodolito tiene una baja productividad debido al tiempo que se requiere para medir diferentes puntos y la periodicidad de las mediciones, resultando más ventajoso el uso de sistemas de barrido automatizados (Tyrsa et al, 2004).

Otro instrumento muy utilizado como apoyo a los métodos geodésicos es el GPS o sistema de posicionamiento Global, (Global Positioning System), que es un sistema de orientación y navegación cuyo funcionamiento está basado en la recepción y procesamiento de información emitidas por una constelación de 24 satélites, permitiendo determinar por triangulación las coordenadas de cualquier objeto en la superficie terrestre (Herring 1996, Fotiou et al 2003).

Es un sistema que por lo general recibe de cuatro a ocho señales de satélites con posición orbital conocida con respecto a la tierra, también se conoce el tiempo que las señales tardan en recorrer el camino entre el satélite y el receptor y la velocidad de propagación de las señales lo cual permite establecer por triangulación posición del receptor en términos absolutos (Pozo et al 2000), como se muestra en la Figura 7.

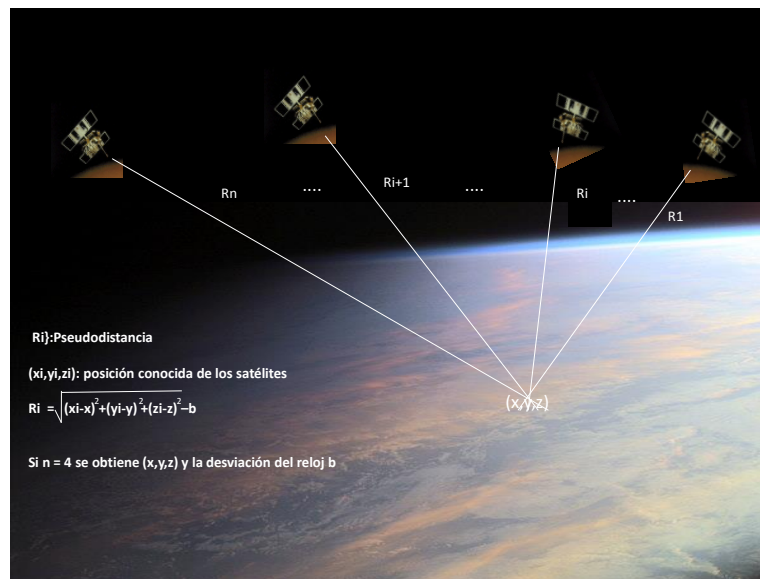


Figura 7. Principio de funcionamiento del sistema GPS

Existen registros de varias aplicaciones de monitoreo utilizando GPS (Rutledge et al 2003, Dai et al 2001). Sin embargo, las mediciones con estos sistemas se ven afectadas por diferentes fuentes de error, ocasionadas por perturbaciones atmosféricas, fenómenos meteorológicos, imprecisión de los relojes atómicos de los satélites, reflexión de la señales, interferencia de disponibilidad selectiva, introducida por el estamento militar, traducándose en un mayor grado de incertidumbre (Pozo et al 2000). Debido a las desventajas anteriores, estos sistemas no son recomendables para aplicaciones en lugares donde el número de satélites visibles es insuficiente para lograr una buena incertidumbre, como es el caso de minas y zonas boscosas entre otras. En algunos casos la incertidumbre puede reducirse mediante el uso de seudo-satélites, pero esto eleva demasiado el costo del monitoreo (Dai et al 2001).

3.1.6. Sistemas basados en barrido óptico

Debido a algunas de las desventajas de los métodos presentados con anterioridad y con el propósito de llevar un registro de datos de manera continua, inicialmente se han desarrollado los sistemas de barrido óptico apoyados en tecnología láser (Gordon et al 2004, Bosch et al 2001) y apoyados en cámaras de video (Aubert et al 2002). Ambos sistemas trabajan a base de técnicas para la reconstrucción de imágenes 3D. Y actualmente se han desarrollado los sistemas de barrido óptico que operan con fuentes de luz incoherente para la construcción de coordenadas en 1D como se desarrolla en el capítulo IV.

CAPÍTULO IV

4. *Sistemas de Barrido Óptico*

Hablar de Sistemas de Barrido Óptico incluye una gran gama de aplicaciones y tecnologías. Ya que un sistema de barrido óptico es aquel que convierte una imagen física, un texto o un objeto, en información que puede ser digitalizada y guardada en un archivo de computadora en 2-D o 3-D, para posteriormente manipularla a fin de obtener un conocimiento de estos datos.

La clasificación de estos sistemas de barrido óptico depende de su aplicación y de la tecnología de los subsistemas de los que están integrados, es decir, su sistema mecánico, sistema electrónico y sistema óptico.

Entre las ventajas de los sistemas de barrido se encuentran la rápida reducción de los tiempos de observación de los datos, bajo costo y rápida reproducción de la estructura, la posibilidad de examinar estructuras y áreas remotas, evitando así problemas de accesibilidad y peligrosidad en la captura de la información; posibilidad de analizar estructuras complejas, donde las técnicas tradicionales no son capaces de generar una información continua tan precisa (Ruiz 2010).

Los sistemas de barrido óptico pueden utilizar fuentes emisoras de luz coherente, como el láser o fuentes de luz no coherente como lo son las bombillas incandescentes. En el caso del láser la captura de datos de campo son en gran medida independientes de la iluminación, por lo que se puede explorar de día y de noche. Sin embargo, existen algunas desventajas como lo es el costo inicial de la inversión, la peligrosidad debido a su alta potencia energética, además de que no pueden penetrar la lluvia y la niebla densa y que las corrientes de aire caliente que suben a las estructuras interfieren en los rayos láser; y es difícil alinear correctamente los emisores y receptores (Silfvast 2004).

Conforme a la definición de resolución, la cual es la mínima variación de la magnitud de entrada que puede apreciarse a la salida (De Silva, 2012), en cada sistema se deben identificar las magnitudes que se desean medir y las variables que afectan su resolución, así por ejemplo: la resolución de un scanner de documentos sería el número de elementos fotosensibles del sensor sobre el área de la superficie donde se coloca el documento, la resolución de un motor de pasos se define como el ángulo del paso y se calcula dividiendo la rotación (360) por el número de pasos

(referencias). En general la resolución de un sistema de barrido óptico, depende del método de barrido utilizado, su diseño y los componentes con los que fue construido.

Actualmente existen algunos métodos y sistemas de barrido que su principio de operación se basa en espejos poligonales, espejos planos o espejos prismáticos, como unidad de desviación de un rayo láser o el haz de luz (Duma 2007). Un elemento que puede limitar la resolución del sistema es precisamente el espejo utilizado como unidad de desviación del haz, el mismo haz de luz dependiendo de su longitud de onda, ya que la frecuencia de la señal es inversamente proporcional a la longitud de onda y el sensor receptor de luz tiene un cierto rango de recepción de frecuencias.

Algunos de los sistemas de barrido, utilizan un espejo rotatorio poligonal, configurado con varias superficies de reflexión equilaterales y equidistantes con respecto al eje de rotación, de tal forma que al girar el espejo, el haz de luz incidente es reflejado secuencialmente por cada una de las superficies de reflexión para ser captado por algún elemento óptico (Harris 1995). En este tipo de sistemas de barrido con espejos poligonales giratorios la resolución está asociada a la dimensión de las superficies de reflexión y a la velocidad de barrido, tienen un ciclo de trabajo mayor que los sistemas con espejos planos (Duma 2007), y presentan errores de seguimiento del barrido (tracking error).

Otro elemento que limita la resolución de los sistemas de barrido es el sensor que capta la luz para convertirla a señales optoelectrónicas que posteriormente serán procesadas. Así por ejemplo en los sensores CMOS o los CCD la resolución se asocia a la superficie de captación y al número de píxeles respectivo y aunque tienen la ventaja de facilitar el procesamiento digital para reproducir una imagen, también tienen la desventaja de no funcionar adecuadamente a largas distancias y en condiciones adversas, en tanto que en los sensores analógicos la resolución se asocia al mínimo cambio en la señal recibida que puede observarse en la señal optoelectrónica de salida y permiten dar un seguimiento continuo a la luz captada.

4.1. Sistemas de barrido basados en el principio laser

Las tecnologías modernas de sensores láser han hecho posible la adquisición de datos 3-D de una manera rápida y exacta, (Tyrsa et al 2004, Peng-Hsiang et al 2004, Diosi et al 2005, França et al 2005, Surmann et al 2003, Lavelle et al 2004, Handbook of Optical and Laser Scanning, 2004, Forman et al 2001, Pierce et al 1992, Gordon et al 2000, Petrov et al 1998). A diferencia de otras tecnologías 3-D existentes basadas en la reconstrucción de imágenes 2-D provenientes de CCD's, estos sensores 3-D permiten determinar la ubicación de objetos mediante el barrido por láser y metodologías geométricas tales como la triangulación (Hernández et al 2006, Rivas et al 2008, Bass 1995).

Sin embargo, en el monitoreo de grandes objetos, presentan algunas restricciones, pues en materiales opacos a distancias muy alejadas el rendimiento es muy bajo al regresar la señal (Gordon 2004).

Otra desventaja de estos sistemas es el rendimiento en condiciones climatológicas adversas como el caso de lluvia y brisa que afectan la recepción de la señal.

4.1.1. Sistemas de Barrido para medición tridimensional (3-D) con láser

Se clasifican por su principio de operación, entre ellos encontramos los sistemas indirectos (por triangulación); un haz laser fuertemente colimado recorre el objeto a analizar, y una o dos cámaras fijas siguen los movimientos del haz sobre el objeto para calcular el paralaje en cada punto por medio de una triangulación geométrica, y obtener la distancia del objeto al sistema de barrido. Y los sistemas directos (por tiempo de vuelo); miden el tiempo de vuelo de un pulso de luz emitido por un láser que es reflejado al incidir sobre el objeto a analizar, determinando el retardo entre la emisión y la recepción de la señal se calcula la distancia del objeto al sistema de barrido, pueden medir distancias de 10,000 a 100,000 puntos por segundo como se muestra en Figura 8. Entre sus ventajas destacan la gran cantidad de datos que pueden ser procesados para extraer geometrías elementales, o algún modelo tridimensional completo, la rapidez en la toma de datos y la configuración mecánica que permite trabajar en zonas de difícil acceso, además no requieren de un operador durante el proceso de barrido en zonas con limitaciones de permanencia (por presencia de radiaciones ionizantes o ambientes tóxicos). Y como desventaja podemos mencionar la gran cantidad

de datos que se requieren ser procesados, y aunque existen una serie de utilidades es un proceso fundamentalmente manual, los sistemas de medición directa dependen de la precisión con la que se puede medir el tiempo y son de elevado coste.

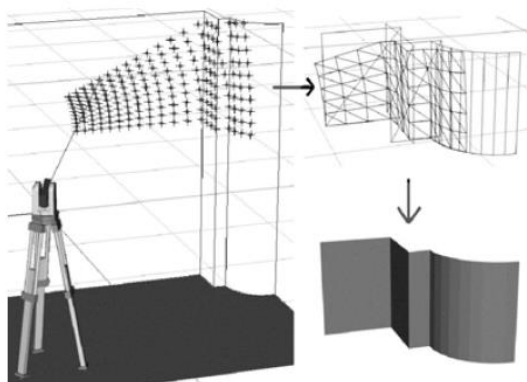


Figura 8. Sistemas de Barrido para medición tridimensional (3-D) con láser

También podemos encontrar los sistemas de diferencia de fase; estos miden la diferencia de fase entre la luz emitida y la recibida, y utiliza dicha medida para estimar el tiempo de vuelo y, por lo tanto, la distancia al objeto al sistema de barrido. El haz láser emitido por este tipo de escáner es continuo y de moderada potencia. El rango y la precisión de este tipo de escáner es intermedio, situándose como una solución entre el largo alcance de los sistemas por tiempo de vuelo y la alta precisión de los sistemas por triangulación. Su alcance ronda los 100 m en condiciones de poco ruido (baja iluminación ambiente), y su error característico ronda los 2 mm por cada 25 m. El alcance está limitado precisamente por su modo de funcionamiento, ya que al tratarse el láser de una señal periódica, existe ambigüedad en dicha señal a partir de una cierta distancia, en función de la frecuencia utilizada. La precisión de la medida también depende de la frecuencia utilizada, pero de manera inversa a como lo hace el alcance, por lo cual estos conceptos son complementarios, y se debe encontrar un punto de compromiso entre ambos, o bien utilizar dos frecuencias distintas (multi-frequency-ranging). El tiempo de adquisición es también intermedio, consiguiendo los modelos actuales velocidades de escaneo que oscilan entre los 100.000 y 1 millón de puntos por segundo, en función de la precisión requerida.

Existen también los sistemas de holografía conoscópica; es una técnica interferométrica por la que un haz reflejado en una superficie atraviesa un cristal birrefringente, esto es un cristal que posee dos índices de refracción, uno ordinario y fijo y otro extraordinario que es función del ángulo de incidencia del rayo en la superficie del cristal. Como resultado de atravesar el cristal obtienen dos rayos paralelos que se hacen interferir utilizando para ello una lente cilíndrica, esta interferencia es capturada por el sensor de una cámara convencional obteniendo un patrón de franjas. La frecuencia de esta interferencia determina la distancia del objeto en el que se proyectó el haz. Esta técnica permite la medición de orificios en su configuración colineal, alcanzando precisiones mejores que una micra. La ventaja de esta técnica es que permite utilizar luz no coherente, esto quiere decir que la fuente de iluminación no tiene porqué ser un láser, la única condición es que sea monocromática.

Los sistemas de luz estructurada; proyectan un modelo de la luz en el objeto y miran la deformación del modelo en el sujeto. El modelo puede ser unidimensional o de dos dimensiones. Un ejemplo de un modelo dimensional es una línea. La línea se proyecta en el objeto que se usa o un proyector de LCD o un láser general. Una cámara, desviada levemente del proyector de modelo, mira la forma de la línea y usa una técnica semejante a la triangulación para calcular la distancia de cada punto en la línea. En el caso del modelo de una sola línea, la línea se barre a través del campo del panorama para reunir información de distancia una tira a la vez. Un ejemplo de un modelo bidimensional es una cuadrícula o un modelo de raya de línea. Una cámara se usa para mirar la deformación del modelo y un algoritmo bastante complejo se usa para calcular la distancia en cada punto en el modelo. Una razón para la complejidad es la ambigüedad. Considere una serie de rayas verticales paralelas de láser que barren horizontalmente a través de un blanco. En el caso más sencillo, uno podría analizar una imagen y asumir que la secuencia izquierda-derecha de rayas refleja la sucesión de los láseres en la serie, así de esta manera la raya de extremo izquierdo de la imagen sea el primer láser, el próximo es el segundo láser, etcétera. En objetivos no triviales que contienen cambio de patrón, hoyos, oclusiones, y de la profundidad, sin embargo, esta secuencia se descompone como rayas que a veces se esconden o pueden aparecer incluso con el orden cambiado, teniendo como resultado la ambigüedad de raya de láser. Este problema particular fue resuelto recientemente por una tecnología de ruptura llamada Multistripe Laser Triangulation (MLT).

Estos sistemas realizan un barrido automático, el barrido horizontal se realiza mediante la rotación del sensor, mientras que el barrido vertical se realiza por medio de un tambor de espejos, midiendo distancia según el método indirecto o directo, unos codificadores determinan los ángulos horizontal y vertical de proyección del pulso y con estos elementos más la distancia obtenida, se determinan las coordenadas espaciales de cada punto del objeto bajo análisis. Y la nube de puntos no estructurados permite la obtención de las características geométricas que definen el objeto bajo análisis (Esténoz 2011, Sánchez-Garnica et al 2003).

4.1.2. Sistema de barrido laser para caracterización dinámica y medición de desplazamiento de estructuras civiles.

Consiste en punteros láser de bajo costo que se adhieren a la estructura, una pantalla y una cámara de vídeo, y algoritmos para el procesamiento de imágenes que operan en un computador. Mide directamente los desplazamientos en estructuras de manera económica y robusta, utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes y visión artificial.

Un láser es proyectado sobre una pantalla, como se muestra en Figura 9, el cual es captado por una cámara de vídeo, cuando la distancia entre el puntero y la pantalla es considerable, es necesario emplear equipo telescópico para evitar la divergencia del haz. El movimiento de los puntos en la pantalla corresponde al desplazamiento de la estructura en las ubicaciones de los punteros láser y es identificado mediante el procesamiento digital de las imágenes registradas con la cámara para reconocer la posición de un puntero del Sensor Láser proyectado en la pantalla, el cual representa la posición de la estructura en ese instante. Sus ventajas consisten en que usa un método de medición directa del desplazamiento, evitando retardos y en que es un sistema de bajo costo. Aunque tiene la desventaja de que cuando la distancia entre el puntero y la pantalla es considerable, es necesario emplear equipo telescópico para evitar la divergencia del haz, la imagen requiere procesamiento de una gran cantidad de datos y se requiere una gran cantidad de cableado, acondicionadores de señal y tarjetas de adquisición de datos (Franco et al 2011).

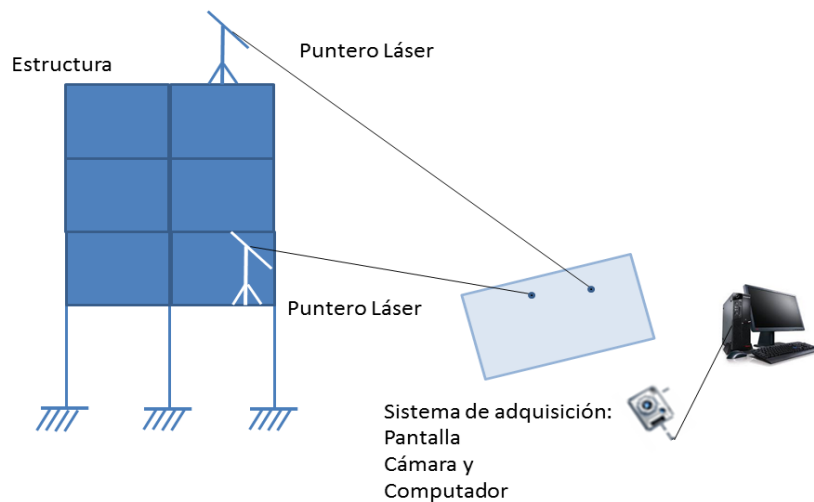


Figura 9. Sistema de barrido láser para caracterización dinámica y medición de desplazamiento de estructuras.

4.1.3. Sistema de barrido para tres dimensiones con vibrómetro láser

Este sistema mide los desplazamientos de estructuras de una manera precisa sin necesidad de contacto con la estructura. Un vibrómetro láser es un instrumento que mide la vibración de una superficie, el haz del láser es dirigido a la superficie de interés, y la amplitud de vibración y la frecuencia son calculadas por el principio del efecto Doppler.

La salida de un vibrómetro láser es generalmente una señal de voltaje análogo continuo que es directamente proporcional a la velocidad de la estructura de interés en movimiento a lo largo de la dirección del haz del láser. Este sistema cuenta con tres cabezas láser que miden directamente las velocidades en tres dimensiones a un punto de interés, de donde desplazamientos, tensión y estrés pueden ser evaluados. Los decodificadores de velocidad digital utilizados en este sistema son capaces de medir desplazamientos de rangos menores de sub-nm, sobre un punto (mancha) de láser de aproximadamente $40\mu\text{m}$ con una resolución espacial aproximadamente de $20\mu\text{m}$ y puede medir una red de más de 512×512 . La resolución angular del servomecanismo en la cabeza del láser es <0.002 grados y señalando una estabilidad (repetitividad) correspondiente a $17\mu\text{m}$ y $87\mu\text{m}$ respectivamente. Este sistema cuenta además con una unidad de barrido geométrico que provee mediciones de barrido con una precisión de $\pm 2.5\text{mm}$. Su

principal ventaja es que no requiere hacer contacto con la estructura, pero tiene la desventaja de la complejidad de la alineación de los tres láseres que utiliza como se muestra en Figura 10, ocasionando un elevado costo (Cazzolato et al 2008).

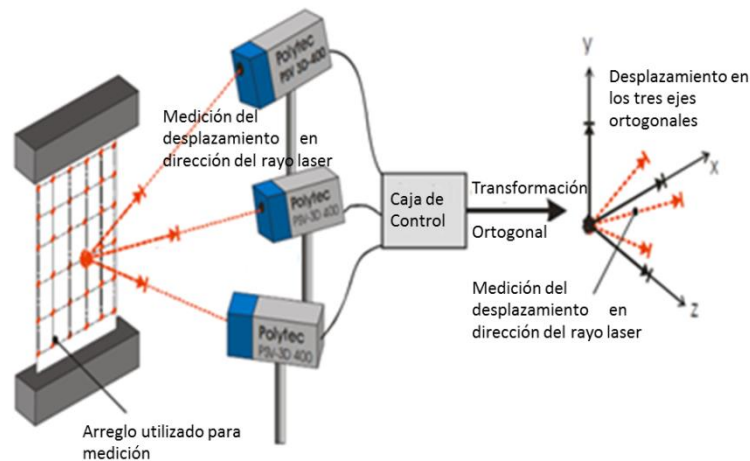


Figura 10. Sistema de barrido para tres dimensiones con vibrómetro láser

4.2. Sistemas de barrido basados en el principio de triangulación

Estos sistemas de barrido se utilizan para realizar mediciones de posición, o medición de geométricas y utilizan el principio de triangulación o variantes de este principio para realizar las mediciones. Estos se consideran sistemas de barrido con sensores estáticos como CCD (Charge coupled device), CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor) y PSD (Position sensitive detectors).

Un sistema de barrido por triangulación está formado por tres subsistemas, un emisor, un receptor y procesador electrónico como se ilustra en la Figura 11, una mancha de luz es proyectada sobre el objetivo y una porción de la luz reflejada por el objetivo es recolectado a través de lentes por un detector el cual puede ser un CCD, CMOS o PSD. El ángulo (α) es calculado en función de la posición del haz de luz sobre los detectores, y por lo tanto la distancia desde el detector hasta el objetivo es computarizado por el procesador electrónico. El tamaño de la mancha de luz es determinada por el diseño óptico del sistema, ya que este parámetro determina los límites de detección de los distintos tamaños de objetivos. Por ejemplo si el diámetro de la mancha de luz es de $30\mu\text{m}$, será difícil que pueda resolver un objetivo $<30\mu\text{m}$ (Kennedy 1998).

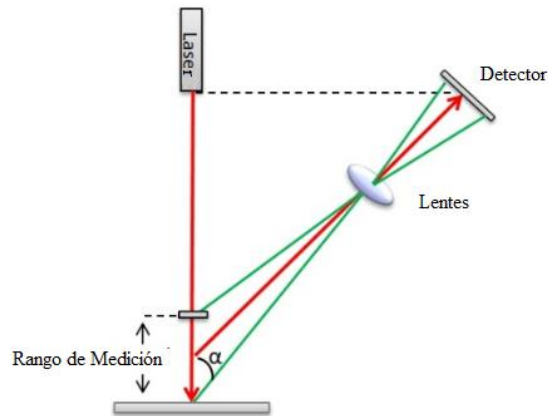


Figura 11. Principio de triangulación

Varios dispositivos son utilizados para los distintos tipos de sistemas de barrido por el principio de triangulación para detectar posiciones, con el propósito de desarrollar y utilizar aquellos dispositivos que permitan sea más eficiente la medición de la mancha de luz. Uno de los métodos para detectar posiciones utiliza una cámara de video para capturar electrónicamente la imagen de un objeto, para posteriormente utilizar técnicas de procesamiento de imágenes para determinar la posición del objeto.

4.3. Sistemas de barrido basados en espejos rotatorios.

Estos sistemas son comúnmente utilizados cuando se realizan mediciones a larga distancia (remote sensing), principalmente en aplicaciones de HSM. El barrido consiste en la observación de una plataforma con sensores pasivos y con fuentes de emisión de luz incoherente y frecuentemente también multi-espectral. Para mediciones a larga distancia (remote sensing) existen distintos métodos de realizar el barrido para obtener los datos necesarios para formar la imagen de la estructura que se está barriendo. Estos métodos se clasifican en “Encuadre (framing)”, “Empuje (push broom)” y “Mecánico (mechanical)”.

- a) Encuadre (framing); estos sistemas no requieren de un movimiento físico de barrido, ya que realizan un barrido electrónico para sensor con una matriz bidimensional de detectores, comúnmente CCD's. La matriz bidimensional de detectores requiere de un sistema óptico con capacidad angular amplia en dos dimensiones.

- b) Empuje (Push broom); en estos sistemas un arreglo lineal de detectores realizan un barrido a lo largo del área de la estructura de la cual se forma la imagen.
- c) Mecánico (Mechanical); estos sistemas utilizan técnicas de barrido en una o dos dimensiones, incorporando uno o múltiples detectores. En el caso de los de una sola dimensión se requiere barrer toda la plataforma con movimiento del sensor o del objeto para poder formar la segunda dimensión del objeto en la imagen.

Entre las técnicas de medición a distancia se encuentra la de Imágenes Hiperespectrales (Hyperspectral Imaging), también conocida como Espectroscopia de Imágenes (Imaging Spectroscopy), con esta técnica los sistemas de barrido son capaces de recoger datos de imagen de alta dimensión, usando cientos de canales espectrales sobre una misma superficie como se muestra en el ejemplo de la Figura 12, donde se mide la radiación reflejada en la región comprendida por las longitudes de onda de 0.4 a 2.5 μ m utilizando 224 canales espectrales con una resolución espectral nominal de 10nm. La gran cantidad de información espectral proveída por esta técnica de Imágenes Hiperespectrales ha dado origen a nuevas perspectivas revolucionarias en muchas aplicaciones, incluyendo la modelización y evaluación ambiental, la detección de objetivos para tareas militares (defensa/ y seguridad), planificación urbana y estudios gestión, prevención y respuesta ante riesgos y peligros, incluye el seguimiento de incendios de zonas silvestres; detección de amenazas biológicas, monitoreo de derrames de petróleo y de otros tipos de contaminantes químicos.

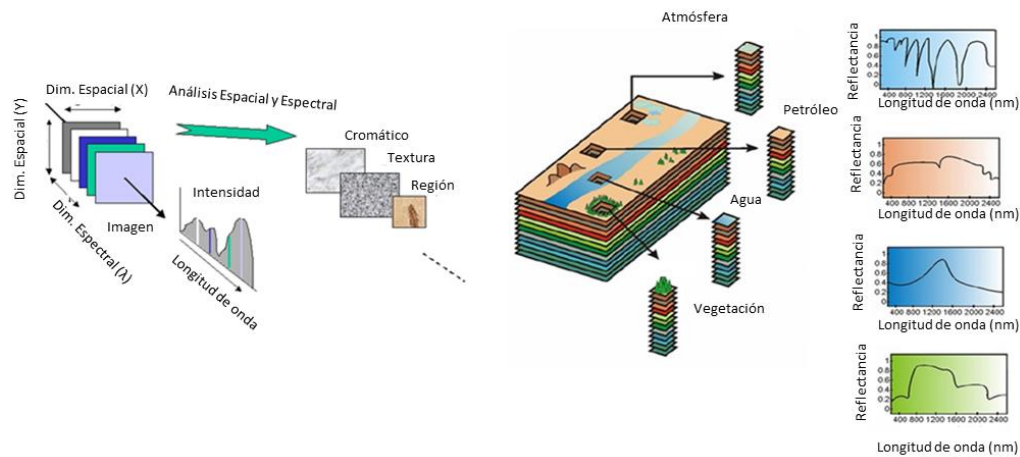


Figura 13. Concepto de técnica basada en Imágenes Hiperespectrales

4.3.1. Sistemas de barrido basados en espejos poligonales

Estos sistemas de barrido tienen un espejo poligonal rotando a velocidad constante por medio de un motor eléctrico y la radiación recibida por los espejos es desviada a un detector, los sistemas de barrido con espejos poligonales son excelentes para explorar (barrer) haces de luz dentro de ciertos límites. Los sistemas de Barrido pueden clasificarse en pasivos o activos, y además pueden clasificarse dependiendo de su tipo de movimiento, ya sea este rotacional u oscilatorio. Así como de su tecnología.

Entre sus principales ventajas se encuentran su habilidad para barrer ángulos amplios, poder ajustarlos a una velocidad estable, generalmente rotando continuamente en una dirección y velocidad establecidas para proveer barridos repetitivos de un campo, un plano o una estructura. Una de sus desventajas es el ser poco prácticos en aplicaciones que requieran cambios rápidos de velocidad de barrido o de iniciar o detenerse.

El método de rotación más común de este tipo de sistemas es montando el espejo poligonal directamente al eje de un motor eléctrico, contribuyendo de este modo a la estabilidad rotacional la inercia del polígono y del motor. Comúnmente velocidades de rotación mayores de 120,000 rpm se obtienen con motores de AC, para aplicaciones donde la proporción de rotación excede la capacidad de un motor eléctrico, las turbinas de gas son una alternativa proveyendo una velocidad de 90,000 a 1,000,000 rpm.

Cuando el número de caras se reduce a una, esta es identificada como un sistema de barrido monogonal. En la Figura 13 se ilustra un sistema de barrido poligonal con espejo giratorio hexagonal.

Los espejos poligonales pueden clasificarse en:

- Polígonos Regulares; tienen espejos planos paralelos al eje de rotación, orientados dándole la espalda al eje de rotación y todos a una distancia uniforme del eje de rotación, y colocados con las mismas coordenada polares. Se utilizan para obtener repetitividad en barridos superpuestos.
- Polígonos Irregulares; tienen espejos planos colocados en una variedad de ángulos con respecto al eje de rotación, son asimétricos.
- Polígonos Invertidos; tienen espejos planos paralelos al eje de rotación, orientados dándole la cara al eje de rotación y todos a una distancia uniforme del eje de rotación, y colocados con las mismas coordenada polares.
- Polígonos Piramidales; tienen espejos planos a un ángulo comúnmente de 45° con respecto al eje de rotación.

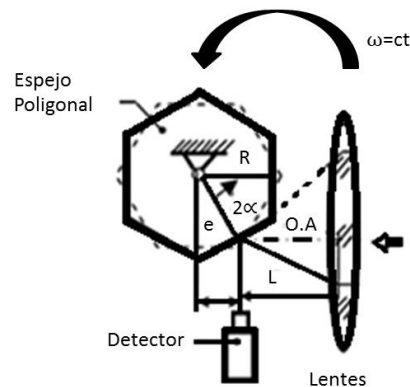


Figura 13. Sistema de barrido con espejo poligonal.

Algunos de los parámetros a considerar en el diseño de un sistema de barrido con espejo poligonal son el diámetro del haz de luz (en mm), la longitud de onda del haz de luz (en mm), la potencia del haz de luz (en kilowatts), el ángulo de barrido (en grados), la proporción de barrido (en Hz); tasa de repetición unidireccional, la eficiencia de barrido (en porcentaje); tiempo de barrido activo entre tiempo total, la eficiencia de la transmisión del haz de luz (en porcentaje), la resolución de barrido (en unidades); haz de luz entre líneas, la linealidad de barrido (en porcentaje); porcentaje de desviación de la velocidad de barrido angular de la velocidad angular de barrido promedio de luz reflejada por las caras de los polígonos (Marshall 1985).

4.3.2. Sistema de barrido basado en espejo piramidal y superficies de reflexión prismáticas

En estos sistemas de barrido la radiación recibida es enfocada en un polígono regular piramidal con una serie de espejos planos con un ángulo de inclinación con referencial al eje de rotación en vez de estar paralelo al eje de rotación. Esta configuración permite realizar barridos a ángulos de exploración más pequeños con menos facetas que aquellos con espejos poligonales. Las principales configuraciones se denominan prismáticas o piramidales. La configuración piramidal permite que los lentes sean orientados cerca del polígono, mientras que la configuración prismática requiere espacio para un paso libre del haz de luz incidiendo sobre él.

4.3.3. Sistema de barrido basado en holografía

Casi todos los sistemas de barrido basados en holografía comprenden de un sustrato el cual se hace girar alrededor de un eje, y utilizan muchas de las características descritas en los conceptos de polígonos. Un arreglo de elementos holográficos colocados sobre el sustrato sirve como facetas, para transferir un haz de luz incidente a uno que realiza un barrido. Como en el caso de polígonos, el número de facetas es determinado por el ángulo de barrido óptico, por el ciclo de trabajo y la resolución elemental es determinada por el ancho del haz incidente y el ángulo de barrido.

4.3.4. Sistema de barrido basado en galvanómetro y resonancia

Para evitar las des-uniformidades obtenidas durante el barrido debido a la variación en las caras de los polígonos o los deflectores holográficos, una solución es evitar las multi-caras, reduciendo el número de caras una superficie de reflexión, el polígono se convierte en un monógono. Este monógono se adapta al tambor interno al sistema que gira para realizar el barrido, el cual logra un alto ciclo de trabajo, realizando una muy grande exploración angular dentro de una superficie cilíndrica. Sin embargo en el barrido a una superficie plana la exploración angular es limitada, resultando también en un ciclo de trabajo limitado proveniente de un monógono. Si el espejo es vibrado en vez de rotado completamente, el intervalo de exploración que se desperdicia puede reducirse. Tales componentes sin embargo deben satisfacer la velocidad, resolución y linealidad del sistema. Los sistemas de barrido vibratorios

incluyen el galvanómetro, dispositivos resonantes y un transductor espejo manejado por un piezoeléctrico como el que se ilustra en la Figura 14.

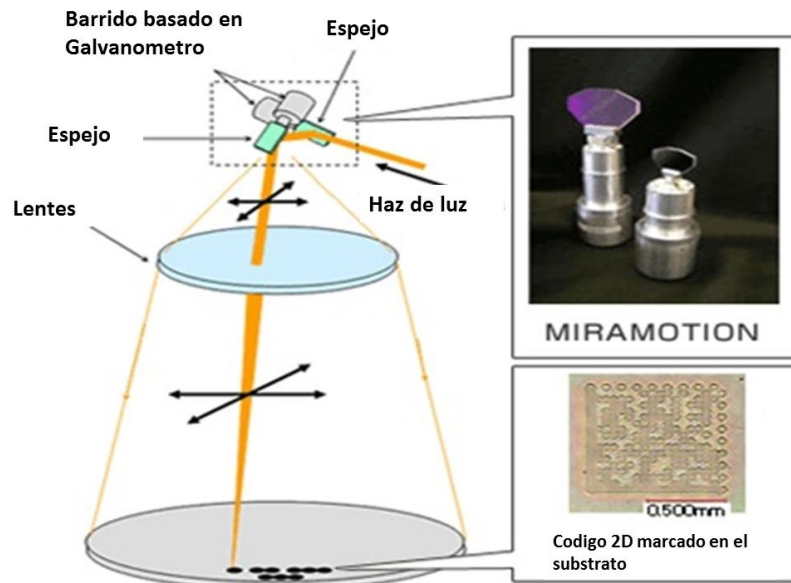


Figura 14. Sistema de barrido basado en galvanómetro y resonancia

4.3.5. Sistema de barrido basado en un espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación

Estos sistemas de barrido surgieron en los primeros diseños, consisten de un espejo rotatorio orientado a 45° como se ilustra en Figura 15.

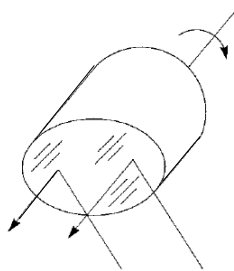


Figura 15. Sistema de barrido basado en un espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación

CAPÍTULO V

5. Resolución de Sistemas de Barrido Óptico

De acuerdo a los objetivos de un sistema de barrido óptico se determinan sus características y las de sus elementos. Por ejemplo: con la resolución deseada, el tipo de datos recolectados y la velocidad de adquisición de datos, son parámetros que deben tomarse en cuenta al seleccionar cada uno de los elementos del sistema de barrido óptico.

El diseño de un sistema de barrido y su funcionamiento resultante (resolución) está definido por una variedad de parámetros que están relacionados a través de ecuaciones y consideraciones definidas a continuación.

5.1. Resolución de sistemas de barrido óptico para mediciones a distancia (Remote Sensing).

En el caso particular de sistemas de barrido para mediciones a distancia (remote sensing), los objetos a detectar se encuentran en una distancia dentro de una plataforma definida por un espacio de observación dado. La apertura de barrido suele ser pasiva y la radiación incoherente y multi-espectral. Los puntos o fuentes de luz barridos son enfocadas por medio de elementos ópticos en un arreglo local, formando una señal que representa las características del objetivo barrido.

El sistema realiza un barrido en una dimensión buscando el objeto mientras que el tiempo representa una segunda dimensión.

La resolución de un sistema de barrido óptico se expresa por el número N de puntos discretos o elementos que pueden ser registrados a lo largo de una trayectoria en el espacio inmediato. La trayectoria es angular y barrida con velocidad uniforme.

5.1.1. Sistemas pasivos con barrido angular

La función de sistemas de barrido óptico basados en espejos rotatorios es la medición del cambio angular de la fuente de luz con respecto a la información del medio que la rodea.

En el barrido angular unas de sus características son la simetría radial y la magnificación de barrido. Cuando un haz de luz converge al eje de rotación del sistema de barrido angular, se dice que este presenta simetría radial. Cuando un sistema de barrido presenta simetría radial provee de una unidad angular de cambio óptico por cada unidad de cambio mecánico. Esto es, $m=d\Theta/d\Phi$, donde Θ es el ángulo de barrido óptico y Φ es el cambio mecánico. El parámetro m es llamado magnificación de barrido (scan magnification), el cual varía entre 1 y 2 dependiendo de la configuración del sistema de barrido, para sistemas de barrido para mediciones a distancia $m=\Theta/\Phi=k$ (donde k es una constante de barrido).

En sistemas de barrido basado en espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación la eficiencia y ciclo de trabajo de barrido es bastante bajo, asumiendo que el ángulo de barrido óptico óptimo Θ es igual al ángulo de barrido mecánico Φ como ocurre cuando existe simetría radial y que solo se realiza un barrido por revolución ($S=1$), con una constante de barrido $k=1$.

En sistemas de barrido en una dimensión se relaciona la velocidad del objeto con la velocidad de barrido angular para producir líneas de barrido en una dimensión por medio de la ecuación (1) y para n elementos detectores por medio de la ecuación (2) y por lo tanto el número de elementos de resolución o pixeles en un sistema de barrido en una dimensión está dado por (3) en radianes o por (4) en grados.

$$\frac{V}{H} = \dot{s} \cdot \Delta\Phi \quad (1)$$

$$\frac{V}{H} = n\dot{s} \cdot \Delta\Phi \quad (2)$$

Dónde:

V = velocidad del objeto (si es que tuviese movimiento).

H =distancia (altura) del objeto que se está barriendo.

$\dot{s}$ =velocidad de barrido en barrido/s.

$\Delta\Phi$ =ángulo de barrido mecánico.

n = número de caras del espejo rotatorio del sistema de barrido.

$$N = \frac{\theta_{max}}{\Delta\theta} \quad (3)$$

$$N = \frac{2\pi\theta_{max}}{360^\circ \Delta\theta} \quad (4)$$

Dónde:

θ_{max} =es el máximo campo de visión en radianes o grados.

$\Delta\theta$ =ángulo de barrido óptico en radianes o grados.

La velocidad de barrido, en barridos por segundo puede ser expresado en función de la velocidad de barrido del espejo por la ecuación (5).

$$\dot{s} = \frac{R \cdot S}{60} \quad (5)$$

Dónde:

$\dot{s}$ =velocidad de barrido en barrido/s.

R = es el barrido del espejo en rpm (revoluciones por minuto)

S =número de barridos realizados por el mecanismo de barrido por revoluciones del sistema óptico.

Concluyéndose que el número de elementos de resolución o pixeles por segundo por línea de barrido está dado por la ecuación (6).

$$\dot{N} = \frac{2\pi\theta_{max}RS}{60 \cdot 360 \cdot \Delta\theta} \quad (6)$$

Dónde:

$\dot{N}$ = número de elementos de resolución

θ_{max} = es el campo máximo de visión en grados.

$\Delta\theta$ = ángulo de barrido óptico en grados.

R = es el barrido del espejo en rpm (revoluciones por minuto)

S = número de barridos realizados por el mecanismo de barrido por revoluciones del sistema óptico.

El campo de visión θ_{max} es determinado por la configuración del espejo de barrido y se define por la ecuación (7), mientras que el cambio mecánico máximo se define por (8), de modo que el número de elementos de resolución se puede definir ahora por la ecuación (9), (Bass et al 2009).

$$\theta_{max} = 360 \cdot \frac{k}{S} \quad (7)$$

Dónde:

θ_{max} = es el máximo campo de visión en grados

k = es la constante de barrido o magnificación de barrido (puede variar desde 1 hasta 2).

S = número de barridos realizados por el mecanismo de barrido por revoluciones del sistema óptico.

$$\Delta \Phi_{max} = \frac{2\pi}{n} \quad (8)$$

$$\dot{N} = \frac{2\pi k R}{60 \cdot \Delta\theta} \quad (9)$$

Dónde:

Φ_{max} =ángulo máximo de barrido mecánico.

n= número de caras del espejo rotatorio del sistema de barrido.

5.1.2. Sistemas pasivos con barrido angular con espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación

Para estos sistemas los objetos a detectar son coordenadas que se encuentran en una distancia dentro de una plataforma definida por un espacio de observación radial dado, en estado estático (sin movimiento) y se identifican por medio de una fuente de luz. La apertura de barrido es pasiva y la radiación incoherente. Los puntos o fuentes de luz son barridos por medio de elementos ópticos en una apertura con un espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación, un detector de luz y un arreglo analógico-digital que captura los resultados del barrido, formando una señal que representa las características del objetivo barrido.

La resolución del sistema de barrido óptico se expresa por el número N de puntos discretos o elementos que pueden ser registrados a lo largo de una trayectoria en el espacio inmediato. La trayectoria es angular y barrida con velocidad uniforme. Durante el proceso de experimentación se observó que la señal optoelectrónica capturada durante el barrido era de forma similar a una señal Gaussiana y que manteniendo la tasa de muestreo de captura de señal constante a 2300 muestras por segundo al disminuir la velocidad de rotación del motor que realiza el movimiento mecánico de la apertura para realizar el barrido se podían capturar una señal mejor definida al aumentar el número de muestras adquiridas en un ciclo de rotación de barrido, como se muestra en Tabla 1 y Figura 16.

Deduciéndose que para reducir errores en medición de posición de la fuente de luz, la mejor solución es realizar el barrido a baja velocidad (baja frecuencia) y tomar la medición en el centro energético de la señal optoelectrónica obtenida durante el barrido de la fuente de luz (Rivas et al 2010).

Tabla 1. Velocidad de Barrido contra Muestras Capturadas

Velocidad de Barrido expresada en Frecuencia de rotación (Hertz)	Periodo (segundos) de un ciclo de barrido	Número de muestras capturadas en un ciclo de barrido (360°)	Imagen
500	0.002	5	Figura 16 a)
200	0.005	11	Figura 16 b)
100	0.01	22	Figura 16 c)
50	0.02	45	Figura 16 d)
30	0.03	76	Figura 16 e)

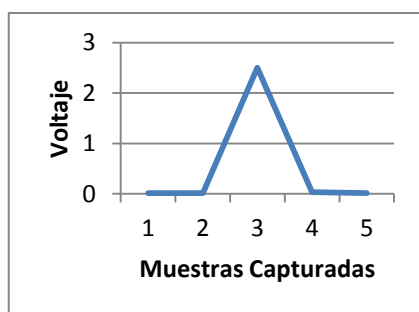
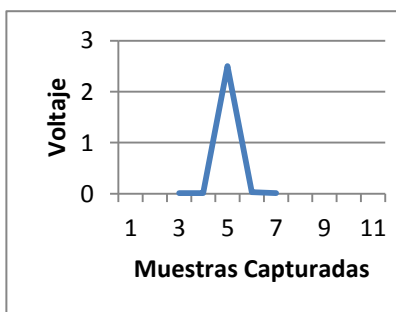
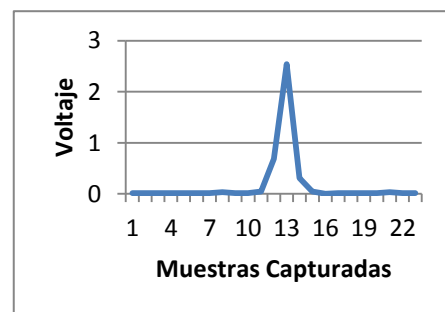
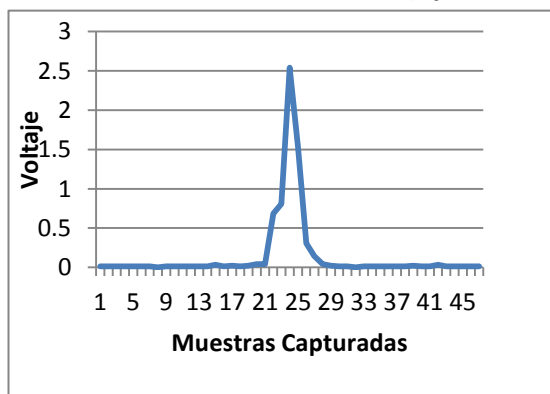
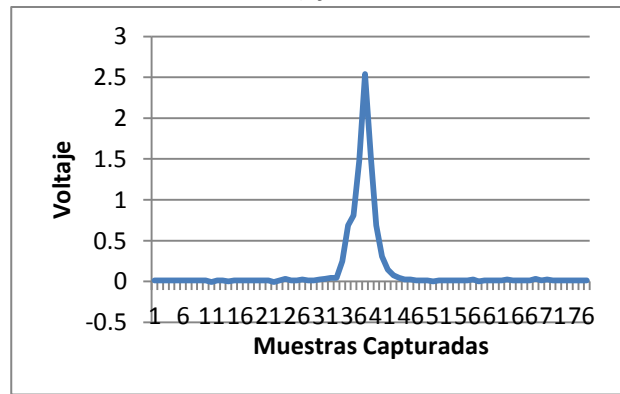
a) $f= 500$ Hz , 5 Muestrasb) $f= 200$ Hz , 11 Muestrasc) $f= 100$ Hz , 22 Muestrasd) $f= 50$ Hz , 45 Muestrase) $f= 30$ Hz , 76 Muestras

Figura 16. Velocidad de Barrido contra muestras capturadas

5.1.2.1. Poder de resolución

En sistemas pasivos con barrido angular y espejo cilíndrico con superficie a 45° de inclinación el poder de resolución es la capacidad de distinguir entre fuentes emisoras de luz (dos coordenadas) muy próximas.

El concepto que se plantea es la distancia angular que puede haber entre dos fuentes de luz (de igual intensidad de radiación) para que el sistema de barrido óptico pueda detectarlas por separado, como se ilustra en la Figura 17. Las fuentes de luz a larga distancia son siempre fuentes puntuales. Sin embargo, debido a la difracción de la luz al atravesar apertura la luz procedente de la fuente de luz crea una imagen anular con un patrón de difracción característico denominado disco de Airy.

Depende normalmente de la máxima extensión del instrumento y de la longitud de onda de trabajo. Cuando la luz procedente de un punto muy alejado atraviesa una abertura circular de un tamaño determinado, la imagen resultante no es otro punto sino una mancha gruesa circular rodeada por anillos concéntricos menos brillantes, que después de ser capturada por un detector de luz es convertida en una señal optoelectrónica con forma tipo Gaussiana. Debido a la difracción cuanto mayor es el diámetro de la apertura, menor es el grosor del punto central y menos brillantes los anillos, de modo que se puede obtener con mayor precisión la coordenada de la fuente de luz; tenemos así mayor resolución. La resolución angular (resolución espacial) describe la habilidad del sistema de barrido para distinguir los pequeños detalles de la fuente de luz barrida convirtiéndola en un factor determinante en la resolución del sistema de barrido óptico.

El límite óptico debido a la difracción puede calcularse de manera empírica a partir del criterio de Rayleigh por la ecuación (10) y cuando la distancia tiende a infinito puede ser expresada por (11).

$$\sin\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (10)$$

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (11)$$

Dónde:

θ es la resolución angular.

λ es la longitud de onda de la fuente de luz

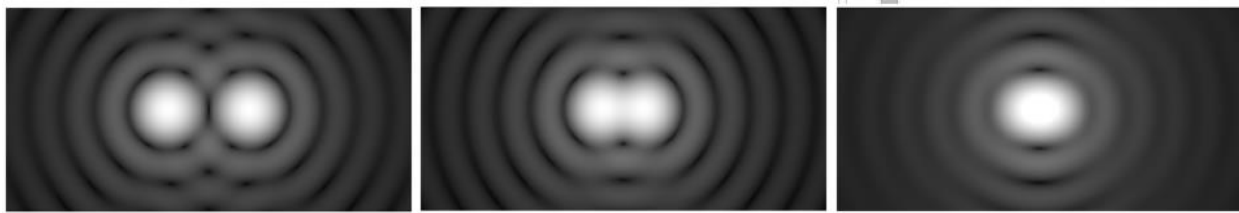
D el diámetro de la apertura

El factor 1.22 se deriva de un cálculo de la posición del primer anillo de oscuridad rodeando el disco de Airy central. Este factor se utiliza para aproximar la habilidad del ojo humano para distinguir dos fuentes puntuales de luz cuyos discos de Airy se superponen.

La resolución angular (θ) puede convertirse en resolución espacial (Δl) por medio de (12) al multiplicar la resolución angular por la distancia a la que se encuentra la fuente de luz (f) es decir la longitud en la cual se detectó y enfoco la fuente de luz.

$$\Delta l = 1.22 \frac{f\lambda}{D} \quad (12)$$

Representando la resolución espacial el radio de la fuente de luz más pequeña que puede ser identificada, siendo el radio de la fuente de luz proporcional a la longitud de onda (Griot 1988).



a) Mínima distancia sin traslape

b) Distancia con traslape inicial

c) Distancia con traslape

Figura 17. Ilustración de efecto de Airy en dos fuentes de luz a distintas distancias de acercamiento.

CAPÍTULO VI

6. Centro Energético de una Señal

Durante experimentaciones realizando barrido de señales optoelectrónicas se encontró que para realizar la detección de posición de una fuente de luz, la señal optoelectrónica obtenida durante el barrido era de forma similar a una señal Gaussiana. Esto es principalmente observado cuando la fuente de luz a ser detectada es una fuente de luz puntual, debido a que el radio de la fuente de luz puntual se expande formando una mancha de luz similar a la forma de un cono o incluso de forma más compleja y difusa dependiendo de la distancia y de las propiedades del medio a través del cual la luz está viajando. Y se dedujo que para reducir errores en medición de posición de la fuente de luz, la mejor solución es tomar la medición en el centro energético de la señal optoelectrónica obtenida durante el barrido de la fuente de luz (Rivas et al 2010).

Partiendo del principio de que el patrón de difracción de un haz de luz difusa que atraviesa una apertura circular tiene una región central brillante conocida como disco de Airy, donde se concentra la mayor intensidad de luz, como se ilustra en la Figura 18, en la presente investigación se analizaron diferentes métodos para encontrar el centro de esta región. La búsqueda del centro energético de una señal se ha utilizado en otras aplicaciones como lo es la astronomía para plantear la distancia angular que existe entre dos estrellas para que se pueda distinguir cada una de ellas. Para lo cual se basan en los principios de difracción, disco de Airy y criterios de Rayleigh a fin de encontrar la resolución necesaria para poder construir un instrumento que separe ambas estrellas.

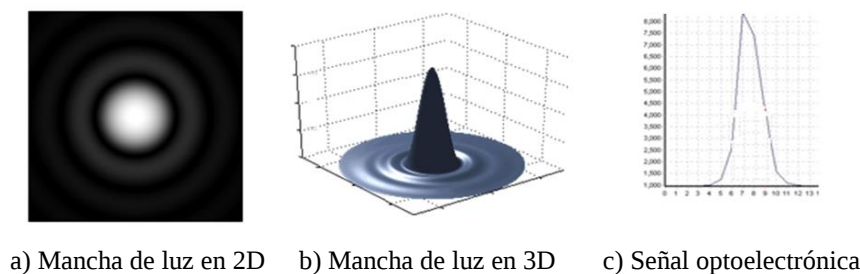


Figura 18. Representaciones del centro energético de una señal optoelectrónica

6.1. Aplicaciones del centro energético de una señal

La búsqueda del centro energético de una señal se ha utilizado en diversas aplicaciones como se desarrolla a continuación.

6.1.1. Centroide de un espectro de audio

En el desarrollo de esquemas de protección para audio “audio digital watermarking”, basado en el cálculo del centroide de cada marco de una señal de audio, para después aplicarle la función Hash a los centroides encontrados y obtener los “watermarking” los cuales son encriptados una vez que las sub-bandas que contiene a los centroides de audio son sometidos a la “discrete wavelet transform (DWT)” y “discrete cosine transform (DCT)”, con el propósito de la seguridad del audio al ser sometido a procesamiento digital (transmisión, almacenaje, copia y edición), este esquema puede autenticar la veracidad e integridad de audio eficazmente. Seleccionando de las características del audio el centroide debido a que es un parámetro estable que no se ve afectado por la manipulación de la señal de audio y ya que este indica donde se encuentra concentrada el centro de la suma de energía de cada bit significativo de cada marco y sub-banda de la señal de audio (Wang et al 2010).

Para el cálculo del centroide se supone la señal digital original de Audio $A = \{a(i), 0 \leq i \leq L\}$, se segmenta la señal en marcos y sub-bandas. La señal digital original de Audio A se divide en M marcos que no se superponen, y se denotan como $A_1(p)$, $p = 1, 2, \dots, M$, y la longitud de cada marco de audio es N , por lo tanto $M=L/N$, después cada marco de audio es dividido en sub-bandas M_1 que no se superpongan denotadas como $A_2(p, q)$, $q = 1, 2, \dots, M_1$, y la longitud de cada sub-banda es de N/M_1 . Se inicia el cálculo del centroide de cada marco por la ecuación (13), calculando la raíz cuadrada del espectro de potencia.

$$D(p, q) = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{N/M_1} \log_2(|A'_t(p, q)|^2 + \alpha)}{N/M_1}} \quad (13)$$

Dónde:

$$A'_t(p, q) = \text{fft}(A_2(p, q)).$$

$A_2(p, q)$ representan la sub-banda q del marco p .

$\text{fft}(\cdot)$ representa la “Fast Fourier transform (FFT)”.

$A'_t(p, q)$ denota la FFT de tiempo t en el coeficiente del dominio de $A_2(p, q)$.

$\alpha > 0$ es un valor de desviación, donde, se adopta $\alpha = 1.01$.

Y finalmente el centroide de audio de cada marco se calcula con la ecuación (14).

$$C(p) = \left[\frac{\sum_{q=1}^{M_1} q \times D(p,q)}{\sum_{q=1}^{M_1} D(p,q)} \right], \quad p=1,2,\dots, M \quad (14)$$

6.1.2. Cálculo de centroides locales en el procesamiento de señales ruidosas

Para el procesamiento de señales ruidosas, este método se basa en el concepto del cálculo de centroides locales de una señal para generar una señal de curva media local “local mean curve” la cual se genera al interpolar los centroides locales calculados, los cuales son centroides promedios locales sobre los segmentos locales entre extremos sucesivos de la señal. El método se basa en la reconstrucción de la media local $\bar{x}(t)$ de la señal $x(t)$, un concepto relevante para las características en el tiempo implicadas en la señal.

Denoten (t_k, x_k) una posición k en un extremo de $x(t)$, donde $t_{k-1} < t_k < t_{k+1}$ ($k=0, 1, 2, \dots$). La secuencia (t_k, x_k) en entrelazar mínimos y máximos, es decir, el mínimo con k impar y el máximo con k par y en consecuencia, $x(t)$ es dividida en una secuencia de segmentos de señal C_k , $t \in (t_k, t_{k+1})$, para $k=0, 1, 2, \dots$ y para cada C_k se puede definir su centro de masa o “centroide” $(\bar{t}_k, \bar{x}_k)$. La siguiente ecuación (15) expresa el centroide C_k de un segmento con longitud l_k calculado por la ecuación (16) desde un mínimo (máximo) (t_k, x_k) al siguiente máximo (mínimo) (t_{k+1}, x_{k+1}) en el plano (t, x) (Hong et al 2011, Esquivel et al 2007, Lazarian 2009, Schuhmann et al 2008).

$$(\bar{t}_k, \bar{x}_k) = \frac{1}{l_k} \int_{C_k} (t, x) ds, \quad (15)$$

$$l_k = \int_{C_k} ds \quad (16)$$

El centroide C_k de un segmento con longitud l_k desde un mínimo (máximo) (t_k, x_k) al siguiente máximo (mínimo) (t_{k+1}, x_{k+1}) en el plano (t, x) , puede ser explícitamente expresado por (17).

$$\begin{cases} \bar{x}_k = \frac{1}{l_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} x(t) \sqrt{1+x'(t)^2} dt, \\ \bar{t}_k = \frac{1}{l_k} \int_{t_k}^{t_{k+1}} t \sqrt{1+x'(t)^2} dt, \end{cases} \quad l_k = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \sqrt{1+x'(t)^2} dt \quad (17)$$

Entonces se obtiene la secuencia de centroides locales $(\bar{t}_k, \bar{x}_k)$, $k=0, 1, 2, \dots$, para $x(t)$. Los cuales reflejan los cambios promedios que cambian en el segmento C_k de $x(t)$ e interpolando los datos se obtiene la curva media local “local mean curve” de $x(t)$ como se muestra en la Figura 19.

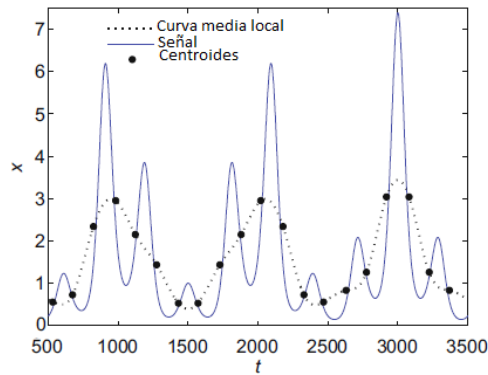
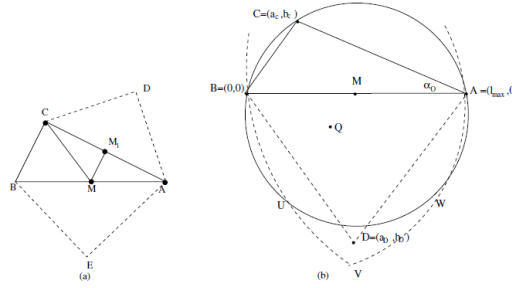


Figura 19. Secuencia de centroides locales

6.1.3. Triangulación de Delaunay

La Triangulación de Delaunay es un método matemático geométrico que cumple con la condición de que la circunferencia circunscrita de cada triángulo de una red de puntos no debe contener ningún vértice de otro triángulo. Y se utiliza para realizar gráficos 3D por computadora con redes de polígonos para modelar objetos tridimensionales juntando los polígonos para imitar la superficie del objeto. La triangulación de Delaunay maximiza los ángulos interiores de los triángulos de la triangulación y de este modo se minimizan los errores de redondeo. Para calcular la triangulación existe el método tradicional “Midpoint” y el método con el cálculo del “Centroide” como se ilustra en la Figura 20, el cual fue desarrollado para mejorar la calidad del cálculo de triangulación ya que este calcula triangulaciones significativamente menores y termina en el ángulo umbral más alto, ya que trabaja para un ángulo arriba de 36° mientras que el método de “Midpoint” trabaja para ángulos $\leq 30^\circ$ (Rivara et al 2010).



a) Método Midpoint b) Método Centroide

Figura 20. Triangulación de Delaunay

6.1.4. Cálculo de posición de un sensor en red inalámbrica por medio del centroide de un cinturón circular

Se desarrolló un algoritmo para calcular la posición de un sensor en una red inalámbrica por medio del centroide de un cinturón circular. En una red inalámbrica existen nodos con posición conocida, llamados “anchor node” que fueron colocados estratégicamente como una referencia y nodos con posición desconocida, ya que solo fueron colocados donde se requería para posteriormente calcular su posición, llamados “unknown node”. Este método consiste en utilizar la información de los “anchor nodes” que se encuentran dentro del rango de radio del “unknown node” formando un cinturón circular (no perfecto, es decir, siempre y cuando existan al menos 3 “anchor nodes” formando un área y el “unknown node” se encuentre dentro de ella) del cual se calcula su centroide estimando que sus coordenadas corresponden a la posición del “unknown node” que se desea conocer. El cinturón circular es obtenido analizando la relación geométrica y la fuerza de comunicación entre los “anchor nodes” y el “unknown node” como se describe en (Lai et al 2007) a fin de obtener las coordenadas del centroide (18).

$$N_j (j \in M_n) = \begin{cases} \hat{x}_j = r_j \cos \gamma_j, \\ \hat{y}_j = r_j \sin \gamma_j, \end{cases} \quad (18)$$

6.1.5. Detección acústica

En la búsqueda de los efectos acústicos de las lluvias atmosféricas por medio de grabar archivos de sonido captadas con hidrófonos, un método para la detección de picos fue desarrollado. El algoritmo de este método es independiente de la amplitud y requiere que la señal analógica sea digitalizada y discretizada, para proceder a evaluar los archivos de sonido captadas por medio de la comparación entre ellos a fin de utilizar un algoritmo de

medición y promedios de coincidencia y no-coincidencias de picos en las señales como describe (Lyashuk et al 2006).

6.1.6. Detecciones biométricas de parámetros en señales de QRS

Existen muchos algoritmos para esta aplicación de detecciones biométricas de parámetros en señales de QRS, entre ellos el método redactado por (Kathirvel et al 2011) donde las ondas R son detectadas a base de una nueva transformación no-lineal y una estrategia simple de detección de picos. El algoritmo consiste en someter la señal a un filtro pasa-banda y una operación de diferenciación a fin de mejorar el complejo QRS y reducir el ruido, después se aplica la transformación no lineal basada en el umbral de energía, en el manejo de energía de Shannon y en un proceso de suavizado para obtener a las características de la señal con valores positivos las cuales incluyen grandes candidatos a picos correspondientes al complejo QRS. Ya que utilizar el umbral de energía permite reducir los picos de los movimientos de músculos. Para la detección de picos se utiliza un diferenciador gaussiano de primer orden para identificar los picos R.

Para aplicaciones sencillas de la detección de picos en áreas como la química, biología, música, ciencias e ingeniería existe una técnica llamada “threshold” o umbral que encuentra los lugares y las amplitudes de máximos y mínimos de una señal que satisface ciertas propiedades para cumplir y/o exceder el umbral requerido. Este algoritmo se usa frecuentemente cuando no se requiere conocer la amplitud y locación exacta del pico, y en vez de eso se requiere saber el número de picos y su lugar en general. Este algoritmo se encuentra en los instrumentos virtuales de Labview National Instruments como “Threshold Peak Detector VI in Lab View” (National Instruments 2006).

Para aplicaciones donde se requiere obtener información específica y de alta resolución de las señales se utilizan algoritmo más sofisticados como lo es el “Wavelet-Based” de Labview National Instruments, este algoritmo puede realizar la búsqueda de los picos utilizando el método de “threshold” (umbral), “curve-fitting-based” (ajustarse a la forma de la señal) (National Instruments 2009).

6.1.7. Detección de posición con detectores ópticos.

Señales optoelectrónicas con diferentes formas son generadas durante el proceso de barrido óptico, dependiendo del tipo de fuente de luz que se esté barriendo y del detector de luz que se esté utilizando para barrer además del mecanismo y circuitería electrónica del sistema. Algunos detectores semiconductores de precisión para detectar señales ópticas como el CCD o el PSD producen salidas de corriente relacionadas con “el centro de masa” de la luz incidente sobre la superficie del detector (Schaefer et al 1998), como se ilustra en la Figura 21, donde se observa que el PSD calcula el centro de toda la cantidad de luz distribuida sobre el área de la mancha de luz, y el CCD detecta el pico más alto de la señal correspondiente a la mancha de luz.

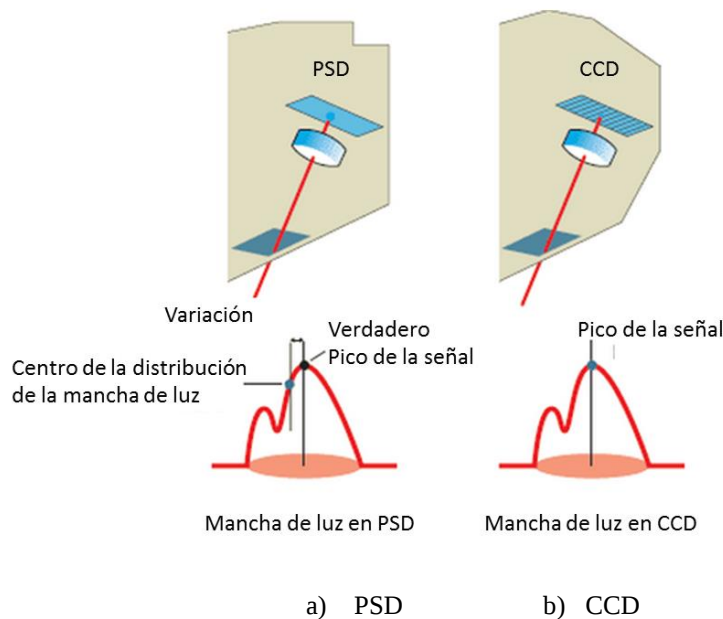


Figura 21. Distribución ideal de una mancha de luz en un detector óptico
(Crédito de la imagen: Measurecentral.com)

Típicamente el proceso de medición de posición a través de sistemas barrido óptico incluye una fuente emisora de luz, puede ser luz coherente como el láser o luz incoherente como la luz de una lámpara, incluye también un detector CCD o PSD como receptor del haz de luz. El cual colecta una porción de la luz que es reflejada desde el objetivo (desde donde se encuentra localizada la fuente emisora de luz). La posición de la mancha de luz en el PSD está relacionada con la posición y la distancia de la fuente de luz (Massari et al 2002). Sin embargo, la distribución real

del fotón en el detector depende de las características dimensionales relacionadas con el patrón de difracción de la luz en el espacio. Algunos ejemplos de las señales más comunes generadas por el registro de luz en cámaras con detector CCD aparecen en estudios acerca resolución e imágenes espectralmente selectivas (Van et al 1998), como se muestra en Figura 22.

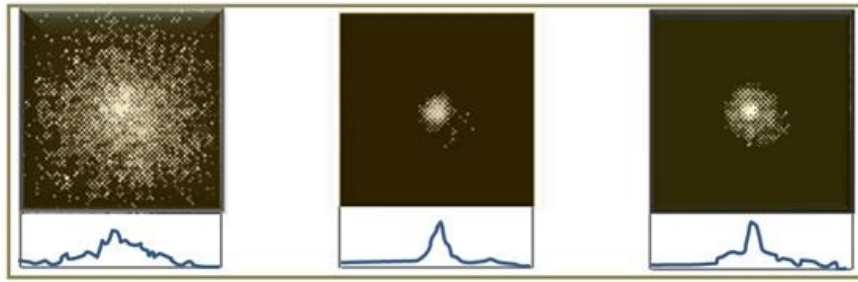
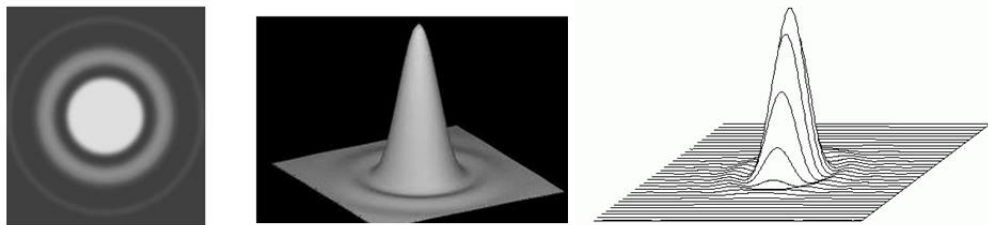


Figura 22. Distribución real de un fotón sobre un detector influenciada por distintos patrones de difracción (Crédito de la imagen: Van et al 1998).

De acuerdo a la Figura 22 y Figura 23 se puede observar que la distribución espacial de la luz produce una señal con la forma de una señal Airy.



a) Patrón de difracción

b) Imagen en 3D

c) Señal en 2D

Figura 23. Efecto Airy

Los detectores CCD, CMOS y PSD usan la distribución espacial de luz (mancha de haz de luz) para determinar el centro de la mancha o centroide e identificar este como la posición del objetivo. Además de los detectores con respuesta en imagen, los detectores con respuesta en señal analógica también producen una señal de tipo Gaussiana cuando se utilizan como detectores en sistemas de barrido con espejo rotario (López et al 2008).

6.2. Métodos para encontrar el centro energético de una señal optoelectrónica

La hipótesis plantea que se puede aumentar la resolución del sistema de barrido, al encontrar el centro energético de la señal emitida por la fuente emisora como se muestra en la Figura 24.

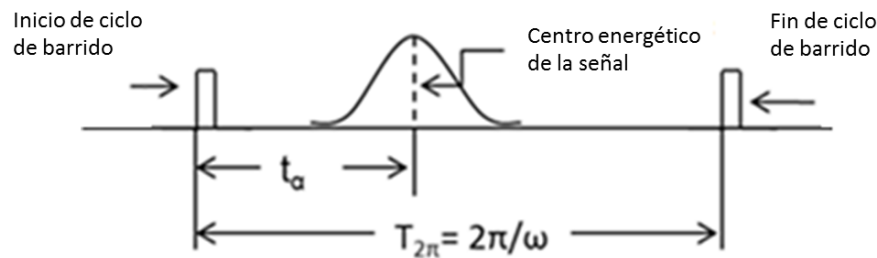


Figura 24. Señal optoelectrónica tipo Gaussiana ideal (simétrica).

La presente investigación se basó en la premisa de que la distribución espacial de la luz emitida por una fuente de luz no coherente, al pasar por una apertura circular, produce un efecto similar al disco de Airy, y que la señal eléctrica ideal producida por el sensor de captación después del barrido genera una señal de forma gaussiana, sin embargo durante experimentación se encontró que esta señal no es una señal tipo Gaussiana perfecta o simétrica, si no que presenta deformación y asimetría como se muestra en la Figura 25 debido a algunos errores del sistema internos y externos, como por ejemplo la excentricidad del motor a baja velocidad de barrido, efectos ópticos sobre la fuente de luz y la apertura óptica, tales como la reflexión, difracción, absorción y refracción. Como se puede observar, se evidenció la necesidad de encontrar un método que permita definir el momento en que se debe calcular la coordenada de posición.

El detector fotodiodo utilizado en sistemas de barrido óptico con espejo rotatorio produce una señal similar a las señales producida por un PSD y CCD, en consecuencia, es posible encontrar el centro de la distribución espacial de la mancha de luz de la fuente emisora de luz utilizada por el sistema de barrido óptico al encontrar su centro energético, para mejorar la precisión de mediciones de posición. En la siguiente sección se explican los seis métodos que fueron desarrollados para localizar el centro energético de la señal optoelectrónica, encontrándose entre ellos un método de procesamiento analógico de la señal optoelectrónica (Analog Saturation and Integration) y cinco métodos

de procesamiento digital de la señal optoelectrónica (Geometric Centroid, Power Spectrum Centroid, Rising Edge, Peak Detection, Digital Saturation and Integration).

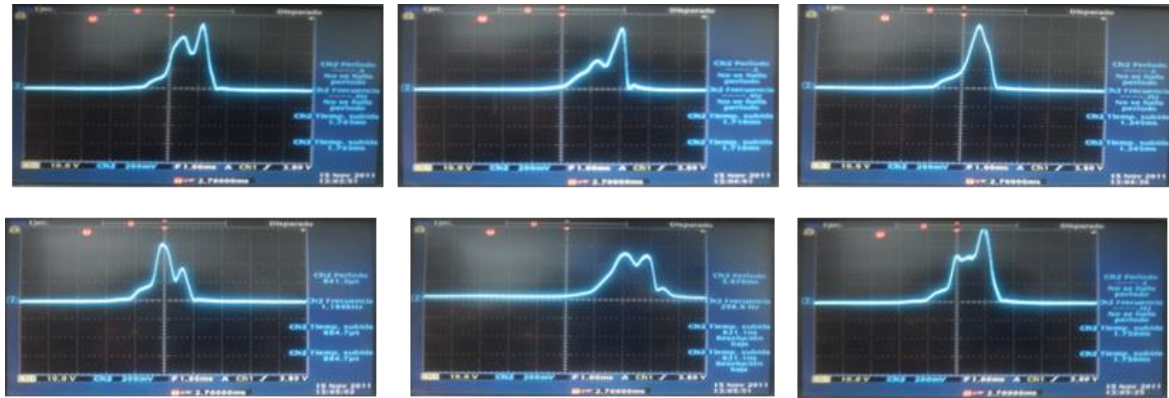


Figura 25. Señales tipo Gaussiana con deformaciones y asimetría.

6.2.1. Saturación e integración de la señal analógica (Analog saturation and integration)

En este método la señal optoelectrónica es procesada a través de un circuito eléctrico. La señal capturada por el fotodiodo es sometida a un circuito que verifica cuando la señal alcanza un nivel de umbral previamente establecido, con el propósito de saber cuánto tiempo la mancha de luz es mayor al umbral (tiempo en función de la frecuencia de barrido) y de este modo calcular la mitad del tiempo, el cual corresponde al instante de tiempo en el que se localiza el centro energético de la señal, y este tiempo es correlacionado con la posición bajo monitoreo. El procedimiento descrito en la Figura 26 para obtener el centro energético a través del método de saturación e integración de la señal analógica se desarrollan en el capítulo ocho (Desarrollo Experimental y Resultados).

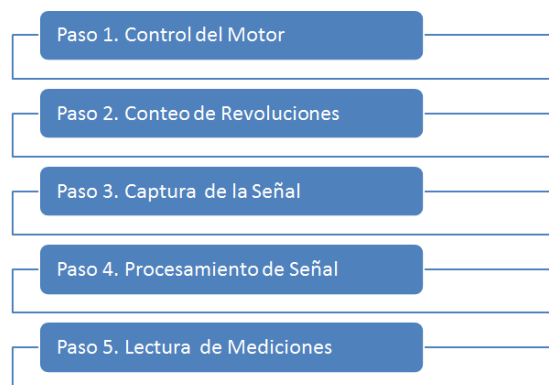


Figura 26. Pasos para la detección del centro energético en el método de saturación e integración de la señal analógica

El procesamiento de la señal consiste en cinco etapas de procesamiento analógico como se muestra en la Figura 27.

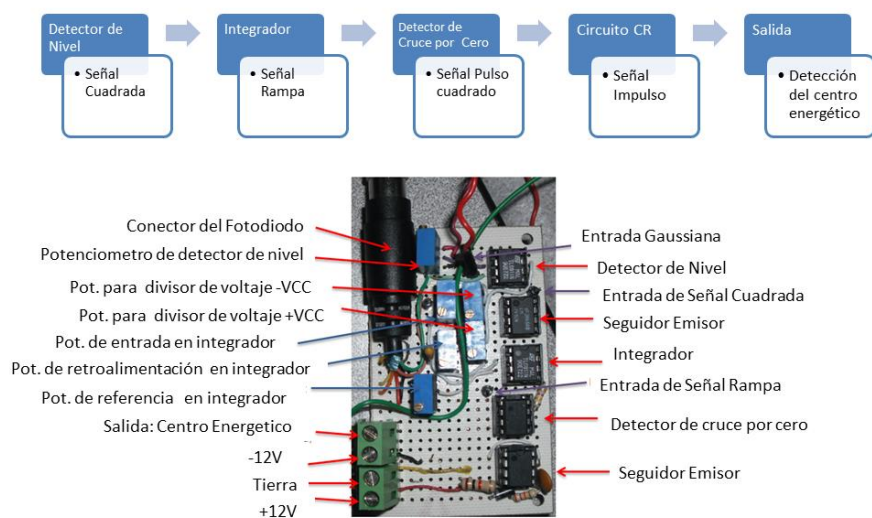
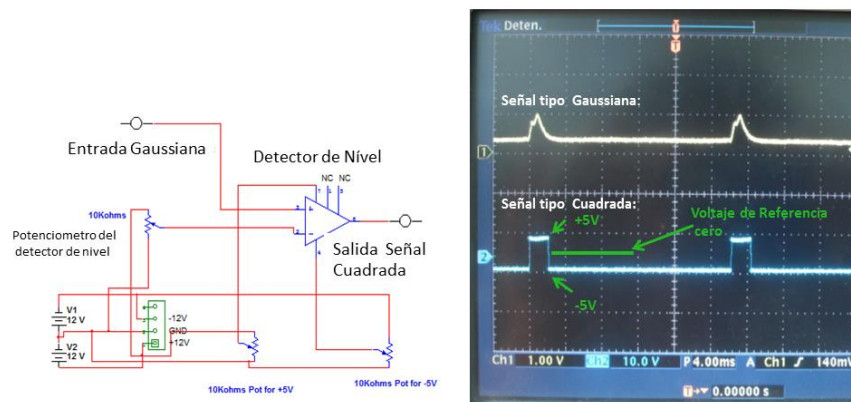


Figura 27. Circuito para procesamiento analógico de señal optoelectrónica.

Etapas 1. Detector de Nivel

En esta etapa se utilizó un componente TL081 (JFET input operational amplifier) como detector de voltaje de referencia para convertir la señal tipo Gaussiana en una señal cuadrada. Se usó un potenciómetro como divisor de voltaje para dar el voltaje de referencia a partir del cual el detector de nivel se iría a saturación positiva o saturación negativa, también se utilizaron potenciómetros como divisores de voltaje en los voltajes de saturación positiva y negativa para ajustar la amplitud de la señal cuadrada para que pudiera ser procesada por el integrador como se muestra en la Figura 28.



a) Esquemático del detector de nivel. b) Señal tipo Gaussiana: Respuesta del fotodiodo. Una señal cada 360°. Señal tipo Cuadrada: Al alcanzar el nivel de referencia se satura a +5V y cuando no supero el nivel de referencia se Satura a -5V

Figura 28. Detector de Nivel.

Etapa 2. Integrador.

En esta etapa se utilizó un componente LM741CN (operational amplifier) con configuración seguidor emisor para acoplamiento de impedancias antes de integrar la señal cuadrada. Y se utilizó un componente TL081 (JFET input operational amplifier) para formar un integrador. El integrador tiene un potenciómetro a la entrada para ajustar el integrador cada vez que cambia el ciclo de trabajo de la señal (que proporción de la señal cuadrada permanece en +5V y cuanto en -5V). El integrador tiene un potenciómetro de retroalimentación para ajustar cada vez que cambia la frecuencia de la señal (velocidad motor). Y además el integrador tiene un potenciómetro para ajustar un nivel de voltaje de referencia a cero cada vez que cambia la forma asimétrica de la señal tipo gaussiana, La integración de la señal cuadrada origina una señal rampa como se muestra en la Figura 29, donde cruza la rampa por el voltaje de referencia cero, es el centro energético de la señal tipo Gaussiana.

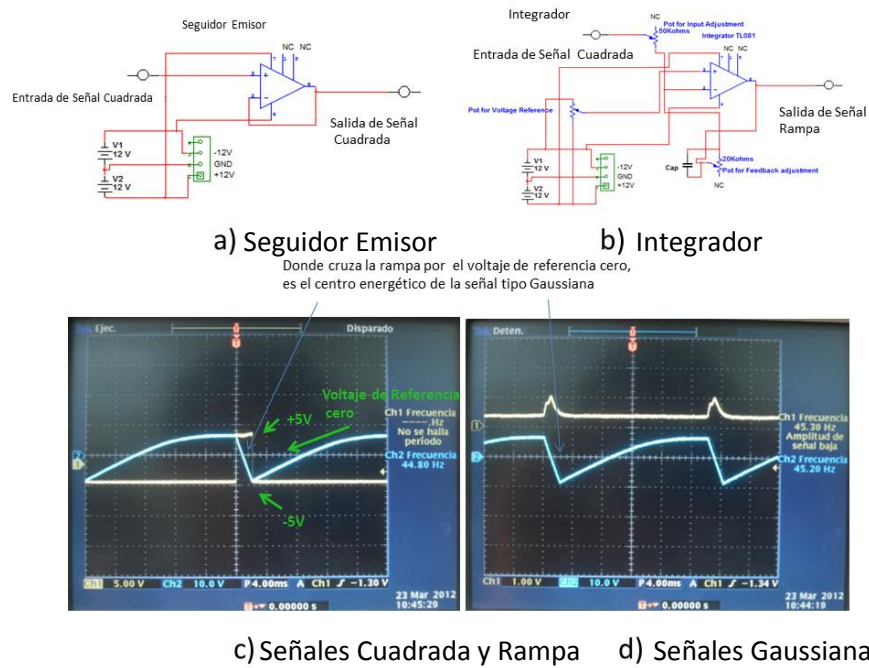


Figura 29. Integrador.

Etap 3. Detector de cruce por cero.

Se utilizó un componente LM311 (single comparator) para detectar el cruce por cero de la señal rampa, donde el flanco de subida indica donde cruzo por cero la señal rampa y esta corresponde al centro energético de la señal como se muestra en la Figura 30.

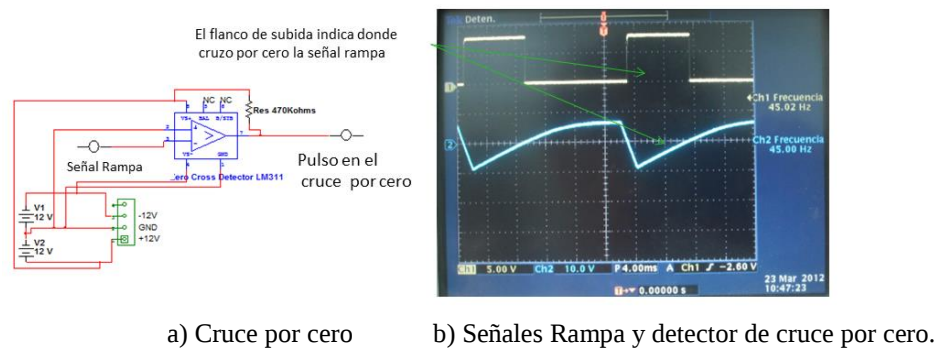
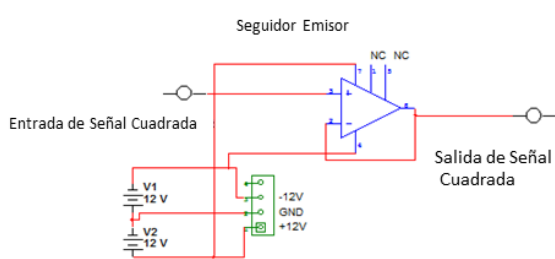


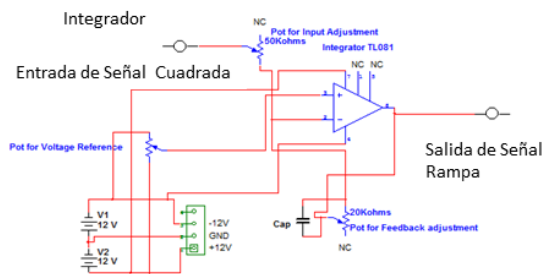
Figura 30. Detector de cruce por cero

Etapa 4. Circuito CR.

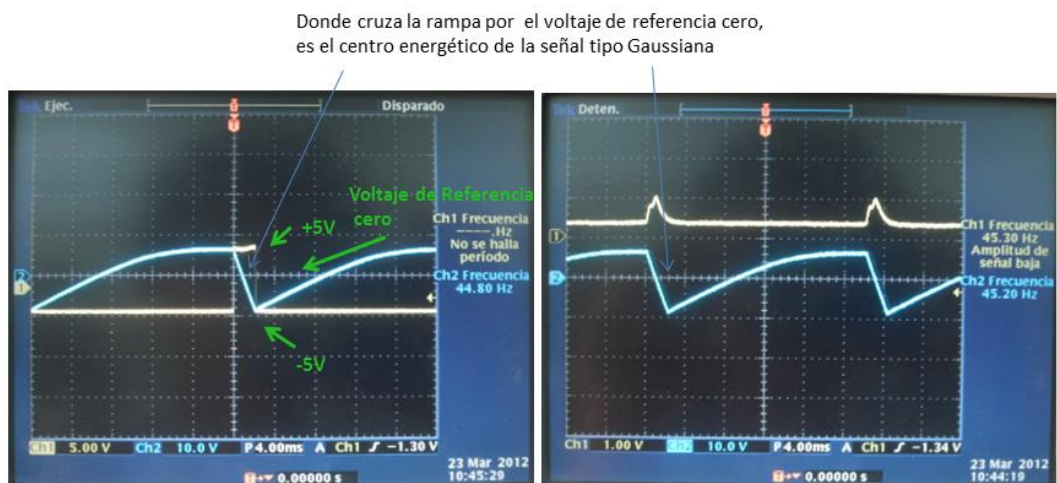
En esta se utiliza un componente LM741CN (operational amplifier) con configuración seguidor emisor para acoplar impedancias. Se utiliza un circuito CR para convertir la señal cuadrada en un pulso en cada flanco de subida de la señal cuadrada del detector de cruce por cero. Finalmente se coloca un diodo para recortar la parte negativa del pulso y este pulso positivo corresponde al centro energético de la señal optoelectrónica, como se ilustra en la Figura 31.



a) Esquemático del seguidor emisor



b) Esquemático del circuito CR y diodo



c) Respuesta del circuito CR

d) Respuesta del diodo

Figura 31. Circuito CR y diodo

Etapa 5. Esta consiste en finalmente tomar las mediciones en el centro energético como se muestra en la Figura 32 por medio de una tarjeta de adquisición de datos DAT de National Instruments.

La ventaja de este método para encontrar el centro energético de la señal optoelectrónica por medio de un circuito eléctrico consiste en que el circuito eléctrico puede ser incorporado en el detector fotodiodo, implementándose entonces una mejora en los fotodiodos, ya que sus resultados no requerirían de post procesamiento de datos, reduciéndose así tiempos de medición y espacio de almacenamiento de datos.

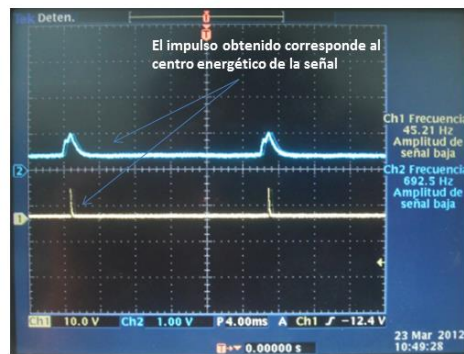


Figura 32. Detección del centro energético por el método de saturación e integración de la señal analógica

6.2.2. Centroide geométrico (Geometric centroid)

Debido a que en temas de física el centroide geométrico, centro de gravedad y centro de masa pueden coincidir bajo ciertas circunstancias a pesar de que ellos implican diferentes conceptos. Fue de interés realizar una correlación entre el centroide geométrico y el centro energético de una señal optoelectrónica. Asumiendo que el centroide geométrico del área bajo la curva de la señal optoelectrónica corresponde a la máxima concentración de energía que porta la señal optoelectrónica dada en forma de una señal en el dominio del tiempo. Estando distribuida la intensidad de luz por unidad de área. Se determina el centro geométrico del área bajo la curva, llamado centroide, utilizando el concepto de momento de un área. A estos momentos con frecuencia se les conoce como primer momento y son linealmente dependientes de la distancia de un punto o una línea de referencia a un área. Si la densidad de masa es constante en un cuerpo modelado como un área bidimensional el centro de gravedad coincide con el centroide, y análogamente si asumiendo que la densidad de luz es constante sobre el detector fotodiodo, su centro energético

coincide con el centroide (Beer et al 1990). Después de la adquisición digital de datos un procesamiento de la señal optoelectrónica fue realizado como se describe en la Figura 33.

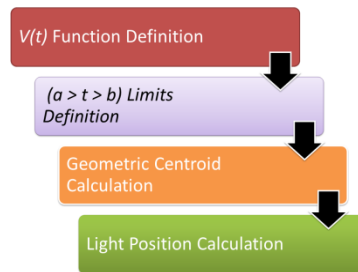


Figura 33. Procesamiento digital para la detección del centro energético de una señal por el centroide geométrico

Como primer paso la señal optoelectrónica es expresada como una función en el dominio del tiempo donde $v=f(t)$, donde t es la variable independiente y v la variable dependiente. Como segundo paso se definen los límites de la función v desde a hasta b ($a > t > b$) para establecer los límites del área debajo de la curva de la cual se calculara su centroide y centro energético de la señal. Posteriormente se realiza el cálculo del centroide por el método de integración, el cual nos dará la posición del centro energético en términos de t . Y finalmente utilizaremos este tiempo para calcular la coordenada espacial para encontrar la posición en la que se encuentra la fuente emisora de luz bajo barrido.

El centroide geométrico es un punto que define el centro de geometría de un objeto, esto es el centro de simetría para una línea, una superficie (área) o un volumen. El centroide ayuda a definir el punto en el que están concentradas todas las fuerzas que actúan en una figura con forma regular e irregular. En geometría el centroide es también conocido como baricentro para figuras planas, es un punto tal que cualquier línea a través de él divide los segmentos en dos partes de igual momento con respecto a esa línea como es representado en la Figura 34. Es también definido como el punto de intersección de las medianas (segmentos que van de cada vértice al punto medio del lado opuesto).

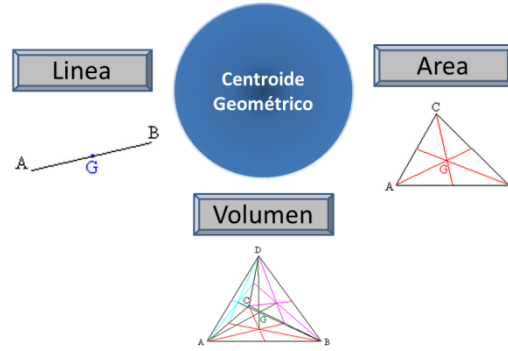


Figura 34. Centroide Geométrico para una línea, área y volumen.

El centro geométrico para una línea con respecto a cada uno de los ejes coordenados x , y y z es calculado por (19), mientras para una superficie (área) es calculado por (20) y para un volumen por (21).

$$\bar{x} = \frac{\int x \, dL}{\int dL} \quad \bar{y} = \frac{\int y \, dL}{\int dL} \quad \bar{z} = \frac{\int z \, dL}{\int dL} \quad (19)$$

$$\bar{x} = \frac{\int x \, dA}{\int dA} \quad \bar{y} = \frac{\int y \, dA}{\int dA} \quad \bar{z} = \frac{\int z \, dA}{\int dA} \quad (20)$$

$$\bar{x} = \frac{\int x \, dV}{\int dV} \quad \bar{y} = \frac{\int y \, dV}{\int dV} \quad \bar{z} = \frac{\int z \, dV}{\int dV} \quad (21)$$

Dónde: $\bar{x}$, $\bar{y}$, y $\bar{z}$ corresponden a las coordenadas del centroide geométrico en los ejes coordenados x , y y z .

El método de cálculo para esta aplicación de señales optoelectrónicas consistió en expresar la señal por una función $v=f(t)$ en un plano bidimensional, donde t es la variable independiente y v es la variable dependiente, obteniendo una superficie homogénea en el área bajo la curva definida por la función $v=f(t)$ de la cual es calculado el centroide geométrico por (20) después de renombrar las variables $t=x$, $\bar{t} = \bar{x}$, $v=y$, y $\bar{v} = \bar{y}$. El centroide geométrico es determinado de las ecuaciones de momentos de inercia (22) y (23), de las cuales aplicando la teorías de límites son obtenidas (24) y (25). Estas ecuaciones (24) y (25) definen las coordenadas $\bar{t}$ y $\bar{v}$ que corresponden al centroide $C(\bar{t}, \bar{v})$ del área A bajo evaluación como se muestra en la Figura 35.

$$\sum M_v: \bar{t}A = t_1 \Delta A_1 + t_2 \Delta A_2 + \cdots + t_n \Delta A_n \quad (22)$$

$$\sum M_t: \bar{v}A = v_1 \Delta A_1 + v_2 \Delta A_2 + \cdots + v_n \Delta A_n \quad (23)$$

$$\bar{t}A = \int t dA \quad (24)$$

$$\bar{v}A = \int v dA \quad (25)$$

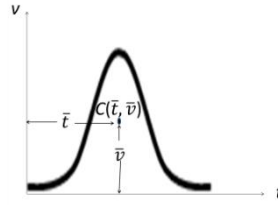


Figura 35. Coordenadas del Centroide Geométrico

Procedimiento:

- Se define la señal optoelectrónica como una función $v=f(t)$.
- Se definen los límites de la función v ($a > t > b$) para establecer el área de energía bajo análisis como se muestra en la Figura 36.
- Se define el diferencial de área como $dA=v dt$ y A por (26).

$$A = \int_a^b dA = \int_a^b v dt \quad (26)$$

- Como el diferencial es un rectángulo, su centroide se encuentra en la mitad de su base y en la mitad de su altura. Se define la coordenada $\bar{t} = t$ del centroide geométrico debido a que dt tiende a cero y la mitad de este es tan pequeño como como lo es dt . Y se define la coordenada $\bar{v} = v/2$ del centroide geométrico. De las ecuaciones (24) y (26) se concluye que la coordenada $\bar{t}$ del centroide geométrico es calculado por (27) el cual corresponde a t_α para calcular I_α y finalmente calcular α el cual corresponde al centro energético de la señal optoelectrónica y la coordenada bajo búsqueda como se describe en el capítulo ocho.

$$\bar{t} = \frac{\int_a^b t dA}{A} = \frac{\int_a^b t v dt}{\int_a^b v dt} = t_\alpha \quad (27)$$

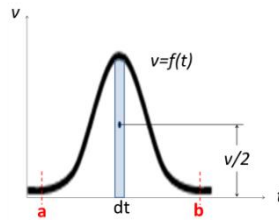


Figura 36. Definición de la función

6.2.3. Power spectrum centroid (centroide del espectro de potencia)

El centroide del espectro de frecuencia es la máxima concentración de energía que porta una señal por unidad de frecuencia (Park 2009), este es relacionado con el centro energético de una señal debido a que el centroide del espectro de frecuencia puede ser considerado como el centro de gravedad de las componentes de frecuencia en un espectro.

El espectro de frecuencia es una función con valores reales positivos en el dominio de la frecuencia, la cual está asociada con la función en el dominio del tiempo, y sus unidades son en potencia por Hertz o energía por Hertz. Después de la adquisición digital de datos un procesamiento de la señal optoelectrónica fue realizado como se describe en la Figura 37.

Los datos son procesados a través de la transformada de Fourier para trasladarlos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, posteriormente es calculado el espectro de potencia de los datos para a continuación calcular el centroide de la concentración de energía por rango de frecuencia, el cual corresponde al centro energético de la señal optoelectrónica y finalmente convertir la coordenada del centroide del espectro de frecuencia en el dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, para determinar la posición en la que se encuentra la fuente de luz que se está barriendo para conocer su posición.

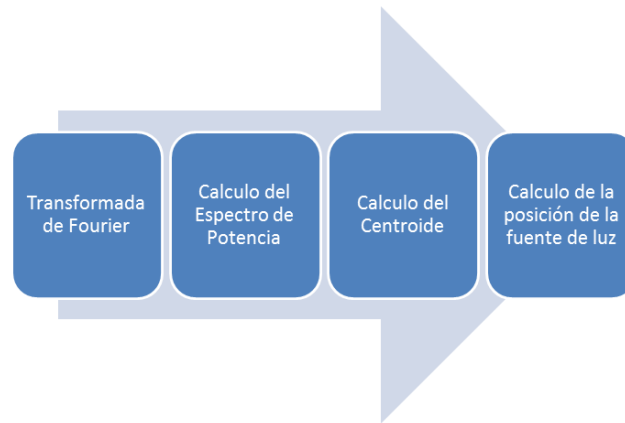
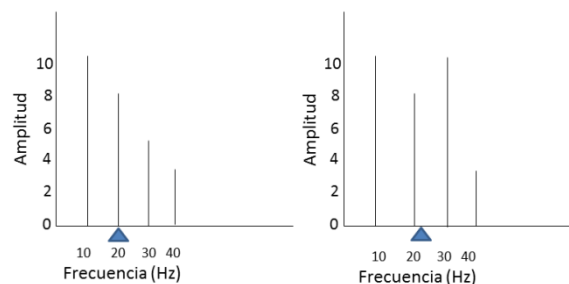


Figura 37. Procesamiento digital para la detección del centro energético de una señal por el centroide del espectro de frecuencia

El centroide es una característica importante del espectro de potencia, esta puede ser considerada como el centro de gravedad de las componentes de frecuencias en un espectro. La Figura 38 muestra dos centroides de espectros de potencia, el primero a 20 Hertz y el segundo a 21.5 Hertz. El parámetro centroide existe en muchas variantes incluyendo entre ellas la media, la desviación estándar y la varianza (Sekey et al 1998). El centroide de un espectro de potencia ha sido observado experimentalmente en trabajos relacionados con procesamiento digital de señales de audio. Ya que en señales de audio el centroide del espectro de potencia corresponde al timbre, característica que describe el brillo de un sonido el cual se usa para identificar escalas de frecuencias y los centroides de las armónicas (Park 2009). En nuestra aplicación se utiliza el centroide del espectro de potencia para encontrar el centro energético de una señal optoelectrónica realizando una correlación entre ambos conceptos.



a) Centroide del espectro de potencia a 20 Hz b) Centroide del espectro de potencia a 21.5 Hz
Figura 38. Centroide del espectro de potencia

El espectro de potencia es una función con valores reales positivos en el dominio de la frecuencia, relacionada a la función de la señal optoelectrónica en el dominio del tiempo, cuyas dimensiones son expresadas en potencia por Hertz o energía por Hertz. Esto significa que la potencia portada por la señal optoelectrónica por rango de frecuencia y su centroide es calculado en el dominio de la frecuencia por medio de la ecuación (28) y el centroide en el dominio del tiempo es calculado por (29), ambos representando el mismo concepto, el centro energético de la señal optoelectrónica (Park 2009).

$$SC_{Hz} = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} k * X^d[k]}{\sum_{k=1}^{N-1} X^d[k]} \quad (28)$$

Dónde:

SC es el centroide del espectro de potencia en el dominio de frecuencia (Hertz).

$X^d[k]$ es la magnitud correspondiente a cada rango de frecuencia k .

k es el rango de frecuencia (fs/N) en Hertz y fs es la muestra de frecuencia.

N es la longitud de la DFT (Discrete Fourier Transform).

$$TC = \frac{\sum_{n=1}^{L-1} nx[n]}{\sum_{n=1}^{L-1} x[n]} \quad (29)$$

Dónde:

TC es el centroide en el dominio del tiempo.

$x[n]$ es la señal de entrada.

n es el índice tiempo.

L es la cantidad de muestras a través del tiempo.

El tiempo de un ciclo de barrido está determinado por la señal de inicio generada por el sensor “s” del Sistema de barrido óptico. Entre una señal de inicio y la siguiente, existe una revolución completa del motor que realiza el barrido, la cual corresponde a 360°.

Esta secuencia de L muestras a través del tiempo es representado por N muestras de rangos de frecuencias después de la transformada de Fourier., y es llamado espectro. Los puntos discretos en el eje de las x (eje de frecuencia) se les conoce comúnmente como contenedores de frecuencia o sólo contenedores (rangos de frecuencia).

Procedimiento:

El primer paso consiste en transformar la función del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia aplicando la transformada de Fourier, la cual provee de una alternativa en el modo en el que es representado los datos, en vez de representar la amplitud de la señal en el dominio del tiempo, la función es representada en el dominio de la frecuencia por cuanto información (potencia) está contenida en los diferentes rangos de frecuencias y de este modo permite también aislar ciertos rangos de frecuencia (que pueden contener ruido) si es necesario. En nuestra aplicación se obtiene la señal optoelectrónica digitalizada como un vector de datos (una serie finita de datos) a la cual se le puede aplicar la transformada de Fourier para transportarla al dominio de la frecuencia, para esto fue utilizado el algoritmo DFT (Discrete Fourier transform), como una aplicación de la transformada de Fourier para datos discretos con datos diferentes de cero y valores finitos.

El segundo paso consiste en calcular el espectro de potencia por (30), el cual es el cuadrado de valor absoluto de los valores de la FFT, estos resultados son considerados como la potencia de la señal en cada rango de frecuencia.

$$\Phi(\omega) = \left| \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n e^{-i\omega n} \right|^2 = \frac{F(\omega)F^*(\omega)}{2\pi} \quad (30)$$

Dónde:

$\Phi(\omega)$ es el espectro de potencia.

ω es la frecuencia angular (2π veces la frecuencia ordinaria).

$F(\omega)$ es la Discrete Time Fourier Transform de $f(n)$.

$F^*(\omega)$ es el complejo conjugado de $F(\omega)$.

El tercer paso consiste en calcular el centroide del espectro de potencia por (28) y finalmente convertir este valor en el dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, la cual es convertida por medio de una correlación entre los rangos de frecuencia y la escala de tiempo o calculando el centroide directamente por (29).

6.2.4. Rising edge (flanco de subida)

Este es el más sencillo de los métodos para encontrar el centro energético de la señal, y consiste en tomar la medición en el flanco de subida de la señal optoelectrónica generada por el sistema de barrido óptico. Una vez que la fuente de luz es capturada por el fotodiodo y la tarjeta de adquisición de datos digitaliza la señal, esta es procesada a través de un algoritmo que detecta en que tiempo la señal generada por el barrido de la mancha de luz alcanza un nivel de umbral previamente establecido (cuando la señal digital pasa de un nivel bajo a un nivel alto), y se determina que este tiempo corresponde al tiempo en el que se localizó el centro energético de la señal, el cual corresponde a t_α para calcular I_α y finalmente calcular α como se describe en el capítulo ocho, el cual corresponde al centro energético de la señal optoelectrónica y la coordenada bajo búsqueda.

6.2.5. Peak detection (detección de picos)

Para la detección de picos en una señal existen diferentes algoritmos y aplicaciones, en esta aplicación de búsqueda del centro energético de una señal optoelectrónica se buscaron los picos de la señal por medio de unos algoritmos estadísticos sencillos utilizados para series de datos con una distribución no-normal (no-paramétrica), para encontrar los picos en la señal a través de criterios de umbral. Estos algoritmos de detección de picos aplicados a los datos de distribución de energía identifican aquellos picos que indican altas demandas de energía, y la más alta corresponde al centro energético de la señal. Cada algoritmo se basa en formalización específica de la noción de un pico de acuerdo a las características propias de la señal optoelectrónica como la ecuación (31) que es utilizada para este tipo de señales optoelectrónicas.

$$S(k, i, x_i, T) = \frac{\frac{x_i - x_{i-1} + \dots + x_i - x_{i-k}}{k} + \frac{x_i - x_{i+1} + \dots + x_i - x_{i+k}}{k}}{2} \quad (31)$$

Dónde:

T es la señal optoelectrónica conteniendo N valores.

x_i es un valor dada la posición i -ésima en la señal T .

$k > 0$ es un número entero dado a k vecinos temporales de x_i (alrededor de la posición i -ésima en la señal T)

S es la función de detección de picos $S(i, x_i, T)$ con i elementos x_i de la serie de datos T .

Un dato en una posición x_i en T es un pico si $S(i, x_i, T) > \theta$, donde θ es un valor de umbral previamente especificado.

6.2.6. Digital saturation and integration (versión digital de saturación e integración)

Este método es una versión digital del método de saturación e integración de señal analógica previamente descrito. En este método la señal capturada por el fotodiodo y adquirida por la tarjeta de adquisición de datos de manera digital es manejada a través de un flujo de procesamiento digital. Este evalúa cuando la señal ha alcanzado un nivel de umbral previamente establecido, y el tiempo que tarda en estar por debajo del umbral para calcular la mitad del tiempo que la señal duro sobre el umbral y determinar esta coordenada como el centro energético de la señal.

La Figura 39 ejemplifica los seis conceptos de los métodos descritos para calcular el centro energético de una señal optoelectrónica.

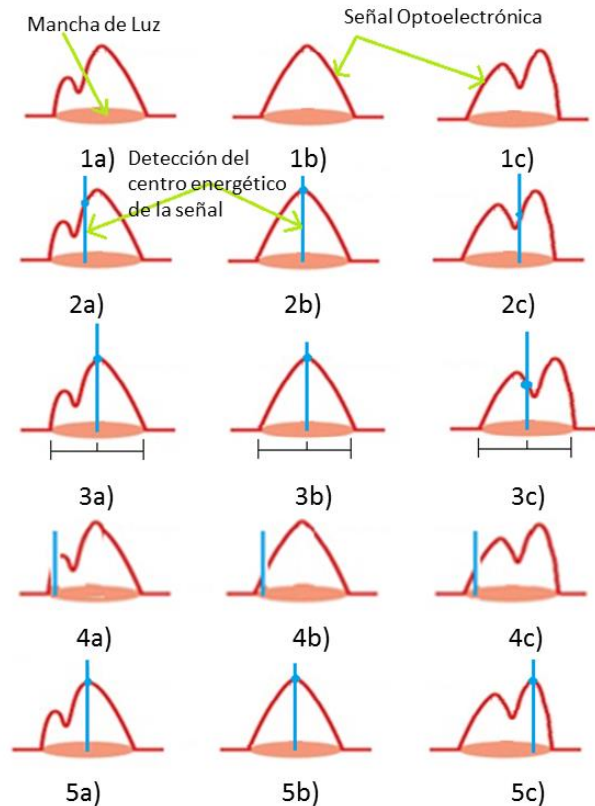


Figura 39. Métodos de detección del centro energético de una señal optoelectrónica

- 1 a,b,c) Ejemplificación de una mancha de luz y de la señal optoelectrónica simétrica y asimétrica.
- 2 a,b,c) Detección por medio del centroide geométrico y del centroide del espectro de potencia.
- 3 a,b,c) Detección por medio del método analógico y digital de saturación e integración.
- 4 a,b,c) Detección por medio del método de flanco de subida.
- 5 a,b,c) Detección por medio del método de detección de picos.

CAPÍTULO VII

7. Algoritmos de Inteligencia Artificial

El sistema de barrido óptico con espejo rotatorio con una superficie a 45° provee de mediciones de posición para tareas de SHM por un método novedoso basado en mediciones geodésicas automáticas. Mediciones precisas de ángulos espaciales planos son realizadas en el centro energético de la señal optoelectrónica, sin embargo estos sistemas de barrido usualmente presentan una variación no lineal en sus mediciones, y generalmente la magnitud de esta variación es influenciada por la posición de la fuente de luz instalada en la estructura bajo monitoreo en relación a la apertura óptica que realiza el barrido, como se muestra en la Figura 40, donde se observa que el error incrementa al alejar la fuente de luz de la apertura óptica y que la mejor ventana de barrido es la que se encuentra alrededor de los 90° .

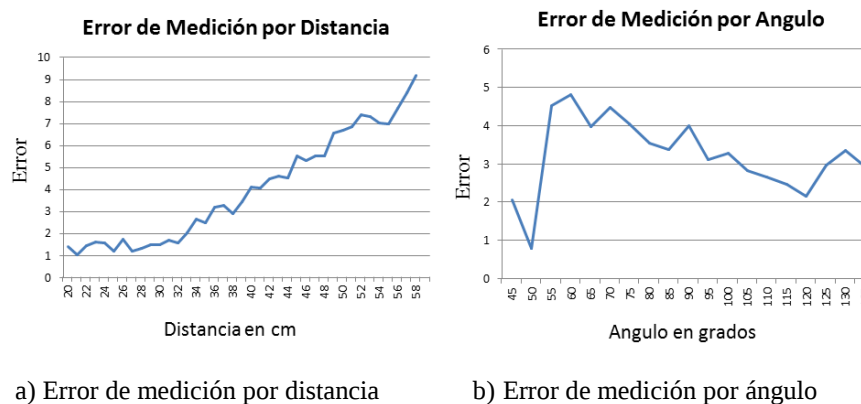


Figura 40. Error de medición por posición

El uso de métodos estadísticos se ha convertido en un tema de interés para muchos investigadores en diversas áreas y el desarrollo de tareas para SHM se ha beneficiado de esta versatilidad de estadísticas, y es así como en el presente trabajo de investigación recurrió al desarrollo y aplicación de algoritmos de inteligencia artificial como una técnica de aprendizaje de máquina para predecir los errores de medición del sistema de barrido óptico y ajustar las variaciones no lineales presentes en las mediciones y de este modo aumentar la resolución y precisión del sistema óptico. Se seleccionaron siete algoritmos los cuales fueron entrenados bajo un diseño de experimento “grid

search” para seleccionar los mejores parámetros de entrenamiento para cada uno de ellos de acuerdo a su concepto y diseño y las necesidades de los datos de entrenamiento. También se hizo uso de la técnica “k-fold cross validation” para seleccionar la mejor partición de datos para realizar el entrenamiento de los algoritmos la cual consiste en particionar de manera aleatoria el conjunto de datos (dataset) en datos para entrenamiento (training data) y datos para prueba (test data). El conjunto de datos se divide en k sub-muestras de igual tamaño. Después k-1 sub-muestras se usan para entrenar el algoritmo y la última sub-muestra es utilizada para probar el algoritmo previamente entrenado. Y este proceso es repetido k-veces rotando las muestras, para seleccionar la mejor partición de datos, como se muestra en la Figura 41.

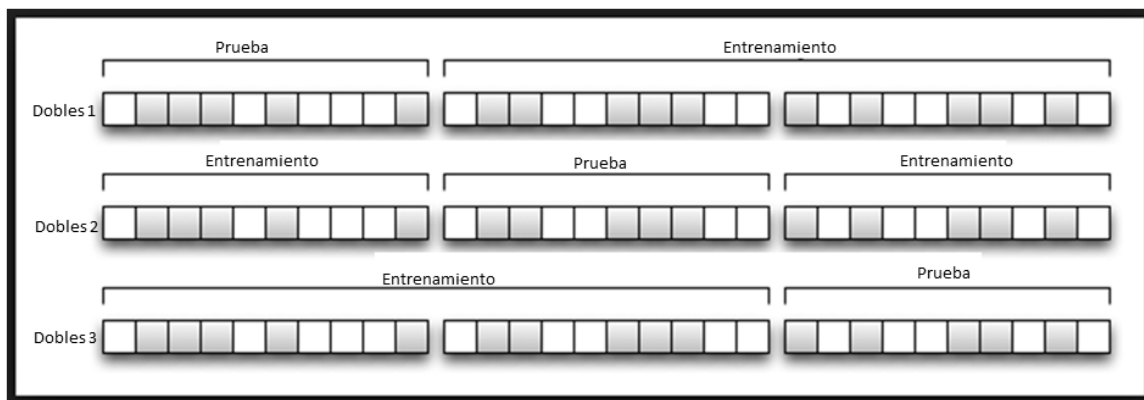


Figura 41. Técnica “k-fold cross validation” (validación cruzada de k-dobles).

7.1. Neuronal Networks (NN)

Neuronal Networks (Redes Neuronales) son utilizadas para aplicaciones donde el análisis formal es difícil o imposible, tales como el reconocimiento de patrones, la identificación y control de sistemas no lineales. Al igual que su contraparte en el sistema nervioso biológico, una red neuronal puede aprender y por lo tanto puede ser entrenada para encontrar soluciones, reconocer patrones, clasificar datos, y predecir eventos futuros. El comportamiento de una red neuronal es definido por la manera en que sus elementos son conectados y por la fuerza de esas conexiones (o pesos). Los pesos son ajustados automáticamente por el entrenamiento de la red neuronal de acuerdo a las reglas específicas de aprendizaje hasta que esta realice las tareas deseadas correctamente. Se puede diseñar y construir redes neuronales con distintas arquitecturas de acuerdo a las características del problema a

resolver como lo es definir sus entradas, salidas, capas (layers) e interconexiones. Las redes pueden clasificarse en supervisadas y sin supervisión.

Las redes supervisadas son entrenadas para producir una salida deseada en respuesta a las muestras de entrada, por lo cual son muy adecuadas para tareas particulares de modelado y control de sistemas dinámicos, clasificación de ruido y predicción de eventos futuros. Entre este tipo de redes se encuentran las siguientes:

- a) Red de retroalimentación “Feedforward networks”; tienen conexión en un solo sentido de la capa de entrada a la capa de salida, son utilizadas comúnmente para predicción, reconocimiento de patrones y para ajustar funciones no lineales, este tipo de arquitectura incluye feedforward backpropagation, cascade-forward backpropagation, feedforward input-delay, backpropagation, linear, y perceptron networks.
- b) Red de base radial “Radial basis networks”, es un método alternativo, es un método rápido para diseñar nonlinear feedforward networks. Incluye regresiones y redes neuronales probabilísticas.
- c) Red dinámica “Dynamic networks”, usan memoria y conexiones recurrentes de feedback para reconocer patrones espaciales y temporales en un conjunto de datos. Son comúnmente utilizadas para la predicción de series de tiempo, modelado y control de sistemas dinámicos no lineales.
- d) Vector de Inteligencia “Learning vector quantization (LVQ)” es un método poderoso para la clasificación de parámetros que no tienen linealidad separable. Se utiliza para clasificar límites y granularidad.

Las redes sin supervisión son entrenadas permitiendo que la red se autoajuste continuamente influenciada por las nuevas entradas. Ellas encuentran relaciones entre los datos y pueden definir automáticamente esquemas de clasificación. Entre este tipo de redes se encuentran las siguientes:

- a) Capas “Competitive layers”, reconocen y agrupan vectores de entrada similares, lo que les permite clasificar automáticamente las entradas en categorías. Son utilizadas para clasificación y reconocimiento de patrones.
- b) Mapas Auto-organizados “Self-organizing maps”, aprenden a clasificar vectores de entrada de acuerdo a su similitud. Igual que competitive layers, son usadas para tareas de clasificación y reconocimiento de

patrones, sin embargo difieren en que son capaces de preservar la topología de los vectores de entrada asignando entradas cercanas a categorías cercanas.

El proceso de entrenamiento y aprendizaje consiste en un procedimiento matemático usado para ajustar los pesos de las redes. Las funciones de entrenamiento generadas dictan un algoritmo global que afecta todos los pesos de la red. Las funciones de aprendizaje pueden ser aplicadas a pesos específicos dentro de una red. Entre los algoritmos de entrenamiento se incluyen varios métodos de descenso de gradiente, métodos de gradiente conjugado, el algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM) y el algoritmo resilient backpropagation (Rprop), (Mathworks 2012).

7.2. Máquinas de soporte vectorial “Support Vector Machine Regression (SVMR)”

Support Vector Machines (SVM) o máquinas de soporte vectorial, fueron desarrollados para resolver problemas de clasificación y regresión en el área de aprendizaje automático y reconocimiento de patrones (machine learning). La meta en modelado de la teoría del aprendizaje estadístico es elegir un modelo del espacio de hipótesis, que sea el más cercano (en nuestra aplicación con respecto a algunos errores de medición) a la función fundamental en el espacio objetivo (Gun 1998).

SVMR puede ser aplicada a: a) Regresión lineal por medio de la introducción de una función de pérdida alternativa (como Quadratic, Laplace, Huber and ϵ -insensitive). b) Regresión no-lineal por medio de un mapeo de datos no-lineal en un espacio de alta característica dimensional donde la regresión lineal es realizada. SVMR es un algoritmo usado para predicción en varios tipos de aplicaciones. (Shinoda et al 2013, Gascón-Moreno et al 2011). Una de estas aplicaciones es la predicción de error en mediciones (Zhang 2008, Choi et al 2008).

Cuando los datos no se pueden separar linealmente se hace un cambio de espacio mediante una función de transformación que aumenta la dimensionalidad de los vectores de entrada a un espacio al que se puedan separar linealmente por un hiperplano. A tal función se llama Kernel. El algoritmo de SVM necesita la función Kernel para asignar los datos originales en el espacio de características, en la cual se realizara la tarea de clasificación o regresión (Pérez-Cruz et al 2004). Y entre los Kernels básicos encontramos:

Kernel Lineal

$$K(x_i x_j) = x_i^T x_j \quad (32)$$

Kernel Polynomial:

$$K(x_i x_j) = (\gamma x_i^T x_j + r)^d, \gamma > 0 \quad (33)$$

Kernel Radial basis function (RBF):

$$K(x_i x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2), \gamma > 0 \quad (34)$$

Kernel Sigmoid:

$$K(x_i x_j) = \tanh(\gamma x_i^T x_j + r) \quad (35)$$

Donde, γ (*gamma kernel*), r (*coefficient kernel*) y d (*degree of polynomial kernel*) son parámetros del Kernel.

7.3. Principal Components Regression (PCR)

El método de PCR al igual que el PLSR (descrito en la siguiente sección) modela una variable de respuesta cuando se cuenta con un grande número de variables de predicción y esas variables de predicción están altamente correlacionas o incluso son co-lineales. Ambos métodos construyen nuevas variables de predicción conocidas como componentes, y estas nuevas variables de predicción son creadas como una combinación lineal de las variables de predicción originales, la diferencia entre PCR y PLSR es la manera en la que se construyen los componentes. PCR crea componentes para explicar la variabilidad observada en las variables de predicción sin tener en cuenta la variable de respuesta en absoluto (Mathworks 2013).

7.4. Partial Least Squares Regression (PLSR)

Este método al igual que PCR construye un conjunto de combinaciones lineales de las entradas de regresión, pero PLSR crea componentes para explicar la variabilidad observada en las variables de predicción considerando la variable de respuesta, y por lo tanto frecuentemente esto conduce a utilizarlo para modelar funciones que se adaptan (o predicen) la variable de respuesta con pocos componentes (Trevor et al 2001).

7.5. Ridge Regression (RR).

Este es un método de contracción (Shrinkage Method), ridge regression contrae los coeficientes de regresión imponiendo una sanción a sus tamaños. Los coeficientes minimizan al residuo de una suma de cuadrados penalizado. En este método el parámetro λ es un parámetro complejo que controla la cantidad de contracción, entre más grande sea el valor de λ mayor será la cantidad de contracción. Los coeficientes son comprimidos de modo que cada uno tiende a cero. La idea de penalizar los parámetros con la suma de sus cuadrados es también utilizada en redes neuronales y es conocida como decaimiento de peso de los parámetros (weight decay), (Trevor et al 2001).

7.6. Least absolute shrinkage and selection operator (LASSO).

Este es otro método de contracción que minimiza el residuo de la suma de los cuadrados sujetos a la suma de los valores absolutos de los coeficientes. Y tiende a producir coeficientes igual a cero y por lo tanto modelos interpretables. LASSO tiene propiedades positivas de dos métodos de contracción, subset selection y ridge regression. LASSO provee de modelos interpretables tal como lo hace el método subset selection y tiene la estabilidad del método ridge regression. Este método comprime algunos coeficientes y otros los convierte a cero, y por lo tanto trata de retener las buenas propiedades de ambos métodos subset selection y ridge regression (Tibshirani 1996).

7.7. Generalized Linear Models Fitting (GLMFIT)

Este método es una generalización flexible de la regresión lineal ordinaria que funciona para las variables de respuesta que tienen modelos de distribución de error distintos de una distribución normal. Este método generaliza la regresión lineal permitiendo que el modelo lineal esté relacionado con la variable de respuesta por medio de una función y permitiendo a la magnitud de la varianza de cada medición estar en función de su valor predicho.

CAPÍTULO VIII

8. Desarrollo Experimental y Resultados

Los sistemas de barrido óptico puede utilizar fuentes de luz coherentes tal como el láser o incoherente como la fuente de luz de los vehículos. En el uso del láser como fuente de luz las mediciones son independientes de la luz ambiental, haciendo posible el poder explorar durante día y noche, sin embargo presenta algunas desventajas como el costo de inversión inicial, el riesgo de utilizarlo debido a los altos niveles de energía que maneja, que no puede penetrar niebla densa, lluvia, ni cortinas de aire caliente que se levanta en las estructuras, ya que interfieren el haz del láser, además de que es difícil alinear correctamente al emisor –receptor.

8.1. Desarrollo de sistema de barrido basado en un espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación

Un sistema de barrido basado en un espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación fue desarrollado por un equipo de investigadores del área de optoelectrónica y mediciones del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California para realizar tareas de SHM, este sistema óptico es un sensor pasivo y puede utilizar como fuente de luz un emisor de luz convencional (luz incoherente) para montarlo en la estructura que se desea monitorear a fin de determinar si su posición (coordenada) cambia debido a deterioros en la estructura. En la Figura 42 se muestra un diagrama general de la apertura óptica de este sistema con un espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación.

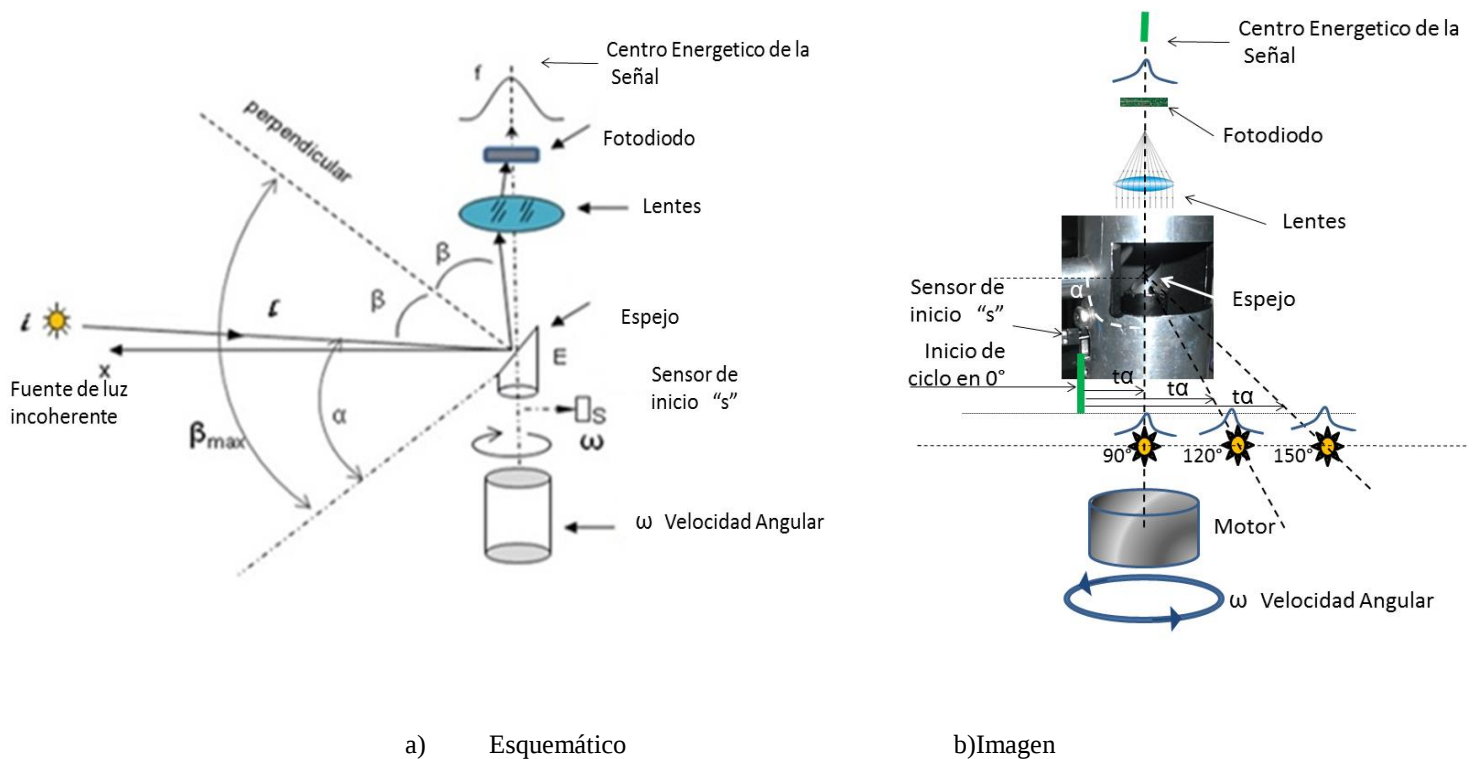


Figura 42. Sistema de barrido con espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación

El sistema óptico con espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación está integrado por una fuente de luz colocada a distancia del receptor, el cual se compone de un espejo E, el cual rota con una velocidad angular ω . El haz de luz emitido arriba al espejo con un ángulo de incidencia β con respecto al eje perpendicular con el espejo, y es reflejado con el mismo ángulo β , de acuerdo al principio de reflexión, para posteriormente pasar a través de unos lentes que concentran el haz de luz para ser capturado por un fotodiodo el cual genera una señal "f" la cual tiene una forma similar a la función Gaussiana, como se muestra en la Figura 43.

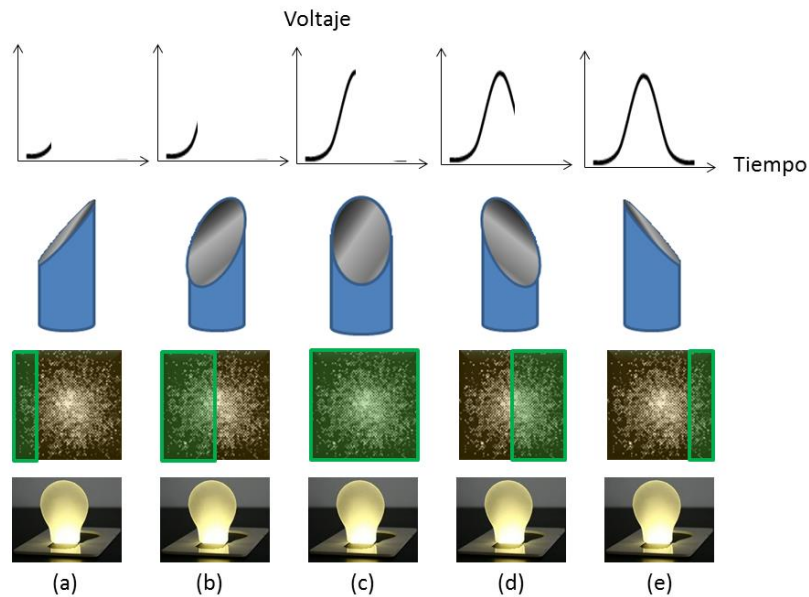


Figura 43. Principio de la formación de la señal optoelectrónica durante un ciclo de barrido

- Superficie del espejo mínima frente al emisor de luz al inicio del barrido
- Medio superficie del espejo frente al emisor de luz al inicio del barrido
- Máxima superficie del espejo frente al emisor de luz durante el barrido
- Medio superficie del espejo frente al emisor de luz al final del barrido
- Superficie del espejo mínima frente al emisor de luz al final del barrido

Cuando el espejo empieza a rotar un indicador ubicado en el motor es sincronizado con el sensor de inicio generando un pulso que indica el inicio de un ciclo de rotación del motor y por lo tanto un ciclo de barrido por parte del sistema de barrido, la Figura 44 muestra como la intensidad de luz incrementa en el centro de la señal durante el barrido (centro energético de la señal optoelectrónica). Y como el sensor de inicio genera un pulso de inicio indicando el inicio de un ciclo de rotación y de un ciclo de barrido cuando $t = 0$.

La distancia $T_{2\pi}$ corresponde a la distancia entre ciclo y ciclo de un pulso de inicio $1m_1$ al siguiente pulso de inicio $2m_1$, y así sucesivamente definido en la ecuación (36), el cual es expresado por el código $I_{2\pi}$ definido en la ecuación (37). t_α es el tiempo en el que se localiza el ángulo deseado medir, es decir, en el cual se encuentra el centro energético de la señal optoelectrónica generada por el haz de luz montado en la estructura bajo monitoreo, siendo $1m_2$ el centro energético encontrado en el primer barrido, $2m_2$ el centro energético encontrado en el

segundo barrido , y así sucesivamente, expresado por el código I_α como se expresa en la ecuación (38) con el objetivo de calcular el ángulo deseado α , el cual se calcula por medio de la ecuación (39).

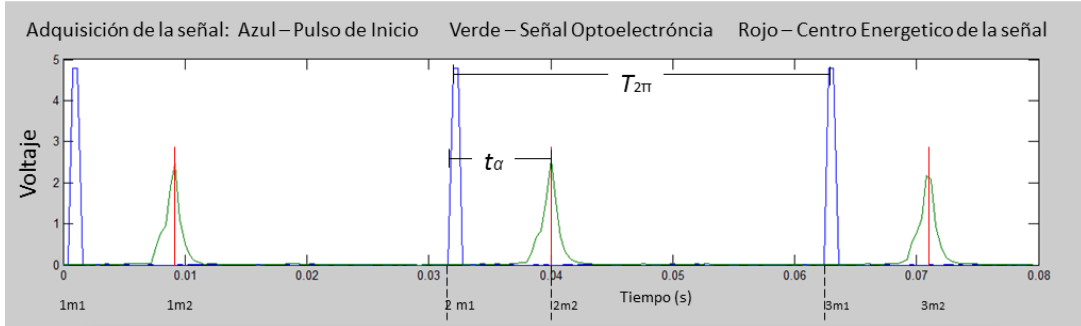


Figura 44. Diagrama de tiempo en la adquisición de datos

$$T_{2\pi} = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{2\pi f} = \frac{1}{f} \quad (36)$$

$$I_{2\pi} = T_{2\pi} f \quad (37)$$

$$I_\alpha = t_\alpha f \quad (38)$$

$$\alpha = \frac{2\pi I_\alpha}{I_{2\pi}} = \frac{2\pi t_\alpha f}{T_{2\pi} f} = \frac{2\pi t_\alpha f}{\frac{2\pi}{\omega} f} = t_\alpha \omega = t_\alpha 2\pi f \quad (39)$$

Dónde:

$T_{2\pi}$ es el interval entre un ciclo y otro, desde x_{m1} hasta x_{m1} .

ω es la velocidad angular.

f es la frecuencia de barrido (ciclos de rotación del motor en un segundo).

$I_{2\pi}$ es el código para indicar el intervalo entre un ciclo y otro, desde x_{m1} hasta x_{m1} .

I_α es el código para indicar el intervalo desde la señal de inicio $t = 0$ hasta el centro energético de la señal $t_{\alpha=CES}$ desde x_{m1} hasta x_{m2} .

α es el ángulo deseado medir desde x_{m1} hasta x_{m2} .

En la Figura 45 se muestra cuatro ejemplos de la señal optoelectrónica cuando la fuente emisora de luz se colocó a 30°, 60°, 90° y 120° con respecto a la apertura de barrido para ilustrar el desplazamiento de la señal y el intervalo I_α desde $t=0$ hasta t_α =centro energético de la señal optoelectrónica.

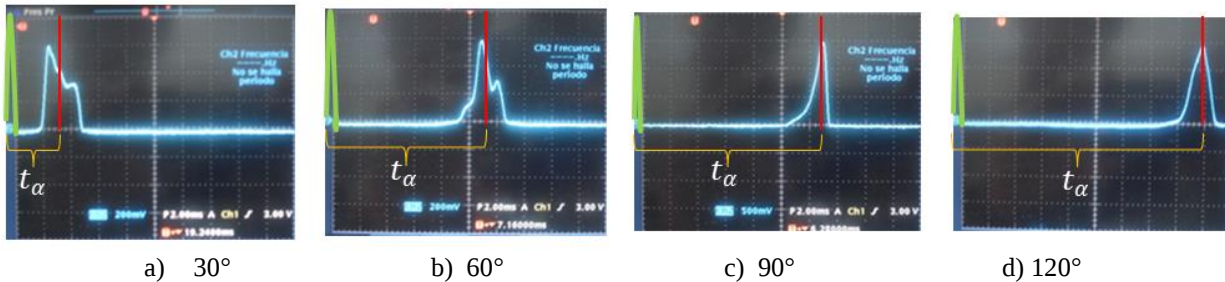


Figura 45. Señal optoelectrónica de fuentes emisoras de luz colocadas a distintos ángulos.

Entre las ventajas de este sistema se encuentra el costo de sus componentes, ya que es un diseño sencillo con elementos económicos, que puede utilizar luz coherente o incoherente, que no se requieren grandes capacidades de almacenaje de datos ya que se registran solo los datos requeridos, el procesamiento de la señal es en tiempo real, ya que el procesamiento de datos consiste de algoritmos sencillos, y que no es impactado por efectos ambientales. Algunas de sus desventajas se encuentran en la inestabilidad del motor cuando se realizan barridos a altas velocidades (alta frecuencia de barrido), y la falta de precisión al determinar la coordenada de posición de la fuente de luz montada sobre una estructura a larga distancia, ya que la mancha de luz incrementa su radio al aumentar la distancia, sin embargo, estas desventajas fueron resueltas por medio de la presente investigación por medio de la toma de mediciones en el centro energético de la señal optoelectrónica y el ajuste de error de medición por medio de un algoritmo inteligente para la realización de la estimación del error.

8.2. Selección del método para detectar el centro energético de la señal.

Etapa Preliminar

Previamente al desarrollo de la presente investigación, un grupo de investigadores del Instituto de Ingeniería había desarrollado la apertura del sistema de barrido óptico con espejo rotatorio y con un ángulo de 45° y observado el comportamiento de la señal optoelectrónica generada al realizar el barrido de una fuente de luz, el cual es similar a la forma de una señal Gaussiana con pequeñas deformaciones (asimetría y ruido), e iniciado la búsqueda del centro energético de la señal optoelectrónica por medio de circuitería electrónica.

El primer método desarrollado fue el “Circuito de control DIFERENCIADOR”, ya que la derivada en un punto de la función representa el valor de la pendiente de la recta tangente a la curva de la función en dicho punto, y si se conoce el valor donde la pendiente es “cero” se encuentran los máximos y los mínimos de la función. Se simuló una función gaussiana utilizando una señal senoidal rectificada, para después hacer pasar la señal por un diferenciador y una vez derivada la señal compararla con una referencia con valor de cero que indicaría el momento justo en que se encuentra la pendiente igual a cero ya que este sería también el momento justo en el que obtendría idealmente el centro de la señal. Sin embargo, al experimentar con la apertura de barrido se obtuvieron señales reales y una vez obtenidas las señales reales se utilizó el mismo método y se encontró que como la señal presenta más de un punto de inflexión el diferenciador encuentra distintas pendientes iguales a cero y por lo tanto no era posible distinguir cuál de ellas correspondía al centro energético de la señal, como se muestra en la Figura 46.

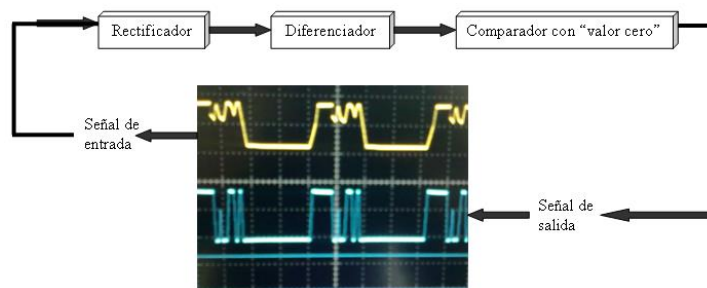


Figura 46. Circuito de control DIFERENCIADOR

Dados los resultados anteriores se propuso utilizar un método de procesamiento analógico de la señal utilizando circuitos lineales, dicho método consistió en transformar la función obtenida del sensor en una señal rectangular y posteriormente integrarla para obtener una rampa bajo la hipótesis de que el centro de la rampa coincide con el centro energético de la señal, como se muestra en la Figura 47. Aunque este método proporcione mejores resultados con las señales simuladas, este método no fue probado con las señales obtenidas directamente de la apertura de barrido, ni se demostró su funcionalidad para detectar el centro energético de una señal en esta etapa de investigación.

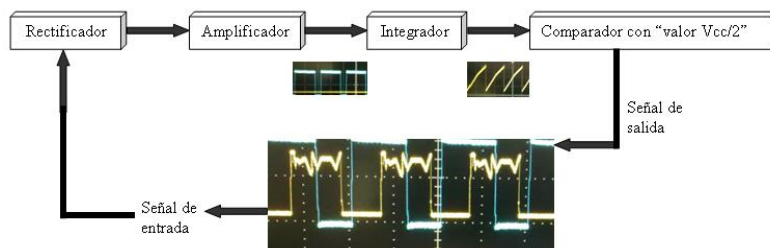
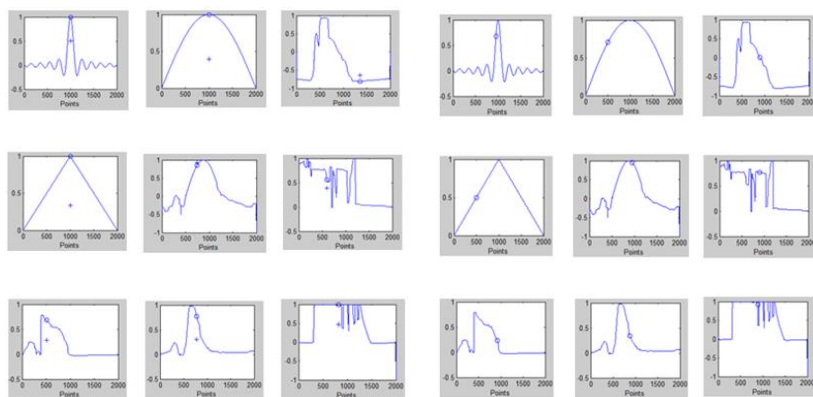


Figura 47. Circuito de control PROCESAMIENTO ANALOGICO preliminar

Y surgió entonces el interés por desarrollar este método de manera experimental y además realizar el desarrollo de métodos por medio del procesamiento digital ya que este provee de herramientas muy eficientes cuando se requiere de una precisión muy exacta.

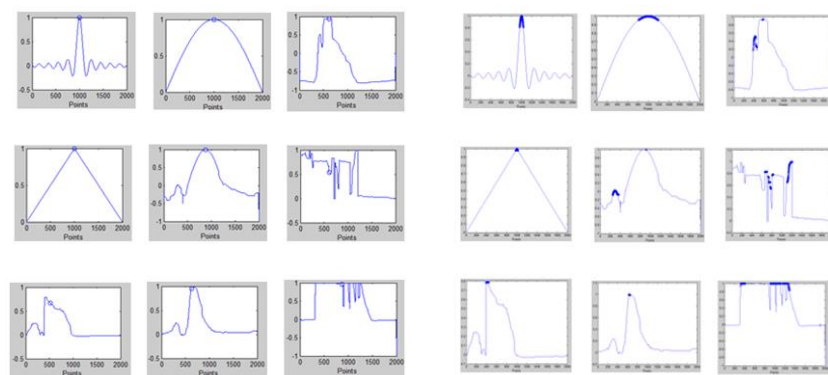
Etapas Inicial

En la primer etapa de experimentación aún no se contaba con señales adquiridas del sistema de barrido óptico y se generaron señales arbitrarias que simulaban el comportamiento visto en previas investigaciones con el propósito de evaluar los primeros algoritmos (Centroide geométrico, Centroide del espectro de potencial, Saturación e integración digital y Detección de picos) desarrollados para la detección del centro energético de la señal optoelectrónica. Nueve Señales fueron simuladas por un generador de señales arbitrarias. Seis señales provienen de lecturas tomadas por la apertura óptica y tres señales de forma ideal, las nuevas señales fueron simuladas en un vector de 2000 muestras a una amplitud de $\pm 1V$. Los algoritmos fueron programados en MATLAB (The MathWorks, Inc.) para realizar la tarea de procesamiento de la señal, obteniéndose los resultados mostrados en Figura 48.



a) Centroide geométrico

b) Centroide del espectro de potencia



c) Detección de saturación e integración

d) Detección de picos

Señal	Centroide Geométrico	Centroide Espectral	Saturación e Integración	Algoritmos Simples
Señal 1	1001	954	1001	71 picos de 966 a 1036
Señal 2	1001	501	1001	377 picos de 813 a 1189
Señal 3	1357	895	617	87 picos de 387 a 589
Señal 4	1001	501	1001	85 picos de 959 a 1043
Señal 5	774	946	876	350 picos de 267 a 1900
Señal 6	596	899	605	211 picos de 463 a 1208
Señal 7	506	918	521	19 picos de 424 a 443
Señal 8	777	871	623	10 picos de 612 a 631
Señal 9	814	886	873	379 picos de 318 a 1900

e) Tabla comparativa de detección

Figura 48. Resultados de etapa inicial del centro energético de una señal

Etapas de Desarrollo Principal

Se desarrolló la etapa de control del motor del sistema de barrido óptico para establecer la frecuencia de rotación y de desarrollo la etapa de adquisición de datos y el desarrollo electrónico y digital de los métodos descritos en la sección 6.2. (Métodos para encontrar el centro energético de una señal optoelectrónica).

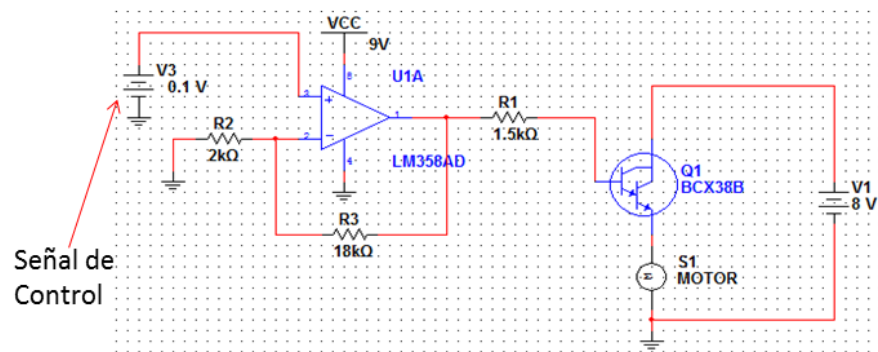
Paso 1. Control del Motor (barrido).

Se diseñó un circuito para controlar la velocidad del motor por medio de un programa en Labview a través de un DAQ USB-6008 de National Instruments, para proveer de voltaje y corriente constante y así disminuir la excentricidad del motor. En la Etapa de control se utiliza un amplificador LM358 en configuración de amplificador no inversor, su función es amplificar la señal de entrada, o señal de control que se le está enviando al circuito por medio de un programa elaborado en Labview a través de la tarjeta de adquisición de datos. En la etapa de potencia,

ya que a la salida del LM358 queremos conectar un motor de corriente directa es necesario conectar un transistor tipo Darlington modelo Tip120, como se ilustra en la Figura 49.

Paso 2. Control del motor.

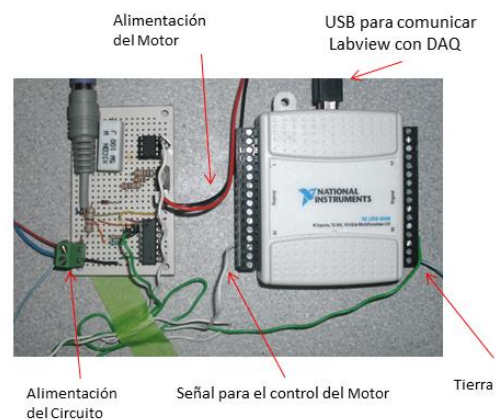
El motor en su eje tiene acoplado un disco, el disco cuenta con un pequeño orificio, un opto acoplador está montado en la apertura, de modo que cada vez que el orificio permita la comunicación entre el fotodiodo y el fototransistor este nos dé un pulso como respuesta a dicha comunicación. Se utiliza un inversor a la salida para obtener un pulso positivo, en donde observaremos un tren de pulsos cuando el motor este rotando. Cada vez que obtenemos un flanco de subida indica que el motor dio un giro completo (360 grados). Y que estamos en el origen, es decir, a 0 grados como se muestra en Figura 44 y 50.



a) Esquemático de etapa de control y potencia

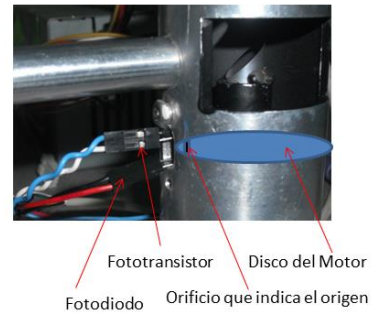
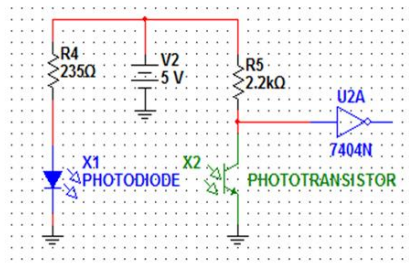


b) Interface de usuario



c) Etapa de control y potencia

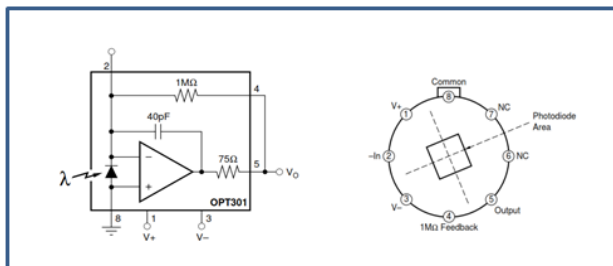
Figura 49. Control del motor



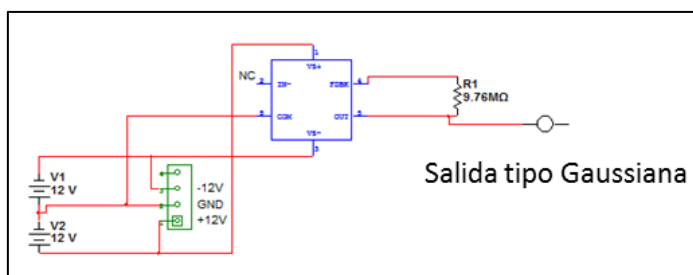
a) Esquemático del control de revoluciones del motor b) Imagen del control de revoluciones del motor
Figura 50. Control de revoluciones del motor

Paso 3. Captura de la señal

Se instaló un fotodiodo con amplificador OPT301 sobre la apertura y se soldaron sus terminales al circuito de procesamiento de la señal y a un DAQ de National Instruments para la adquisición digital de la señal optoelectrónica para el desarrollo del centro energético por medio digitales que se explicara en las siguientes secciones, ver Figura 51.



a) Terminales del fotodiodo



c) Esquemático



b) Imagen del fotodiodo montado en apertura de barrido

Figura 51. Captura (adquisición) de señal

Se procedió a realizar pruebas experimentales para evaluar cuál de los métodos de detección del centro energético de la señal optoelectrónica generada por el sistema de barrido óptico al monitorear fuentes de luz montadas en una mesa óptica simulando su montaje sobre una estructura demostraba mejores resultados sobre los otros métodos. Seis métodos fueron desarrollados y evaluados para localizar el centro energético de la señal optoelectrónica, encontrándose entre ellos un método de procesamiento analógico de la señal optoelectrónica (Analog Saturation and Integration) y cinco métodos de procesamiento digital de la señal optoelectrónica (Geometric Centroid, Power Spectrum Centroid, Rising Edge, Peak Detection, Digital Saturation and Integration). Una base de datos fue construida con aproximadamente seis mil registros (6000 localizaciones distintas de la fuente de luz sobre la mesa óptica), para cada uno de los seis métodos de localización del centro energético. Las mediciones fueron realizadas de forma radial desde 45° hasta 155° (cada 5°), y realizando un desplazamiento de la fuente emisora de luz en cada ángulo bajo evaluación desde 20 cm de la apertura óptica hasta aproximadamente 80 cm. Como se ilustra en Figura 52.

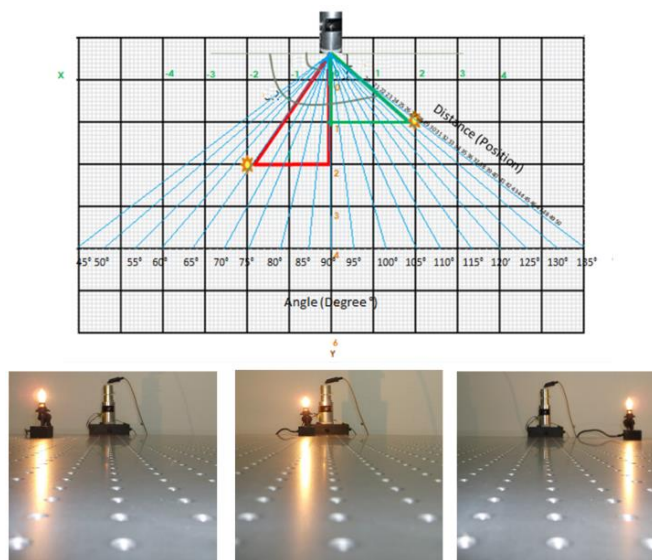


Figura 52. Representación de mediciones por ángulo y distancia (Ángulo de barrido cada 5° y distancia de barrido cada 1 cm).

Los métodos fueron evaluados por medio del Error Cuadrático medio (MSE), por medio del parámetro de correlación R (Regresión Lineal), por clasificación de error por medio de mapas de colores (de manera cualitativa y cuantitativa) y de manera estadística.

El MSE fue calculado por (40) obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 2.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_M - \alpha_T)^2 \quad (40)$$

Dónde:

n es la cantidad de mediciones en la base de datos

α_M es el ángulo medido por el sistema de barrido óptico.

α_T es el ángulo objetivo o “target” (valor convencionalmente verdadero).

Tabla 2. Comparación de los métodos de detección del centro energético por medio del MSE

Método de detección del centro energético	MSE	Orden de mejores resultados
Analog saturation and integration (saturación e integración de señal analógica)	9.21	2
Geometric centroid (centroide geométrico)	8.50	1
Power spectrum centroid (centroide del espectro de potencia)	18.07	4
Rising edge (flanco de subida)	204.17	6
Peak detection (detección de picos)	27.40	5
Digital saturation and integration (versión digital de saturación e integración)	9.23	3

El parámetro de correlación R (Regresión Lineal) fue utilizado para medir la fuerza de la asociación lineal entre dos variables numéricas, el ángulo medido por el sistema de barrido óptico y el ángulo objetivo o “target” obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación de los métodos de detección del centro energético por medio del parámetro de Correlación R.

Método de detección del centro energético	Parámetro de correlación R	Orden de mejores resultados
Analog saturation and integration (saturación e integración de señal analógica)	0.9960	4
Geometric centroid (centroide geométrico)	0.9964	1
Power spectrum centroid (centroide del espectro de potencia)	0.9928	6
Rising edge (flanco de subida)	0.9954	3
Peak detection (detección de picos)	0.9942	5
Digital saturation and integration (versión digital de saturación e integración)	0.9963	2

El error de todas las mediciones fueron calculadas por (41).

$$E_o = \alpha_M - \alpha_T \quad (41)$$

Dónde:

E_o es el error inicial (sin ajuste de error de medición).

α_M es el ángulo medido por el sistema de barrido óptico.

α_T es el ángulo objetivo o “target” (valor convencionalmente verdadero).

Y las mediciones de cada método de detección del centro energético se clasificaron en tres grupos de acuerdo a su error de medición, clasificación roja (mediciones con error mayor a 6.00°), clasificación amarilla (mediciones con error mayor a 3.00° y menor de 5.99°) y clasificación verde (mediciones con error menor de 2.99°). Obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 53 y Tabla 4.

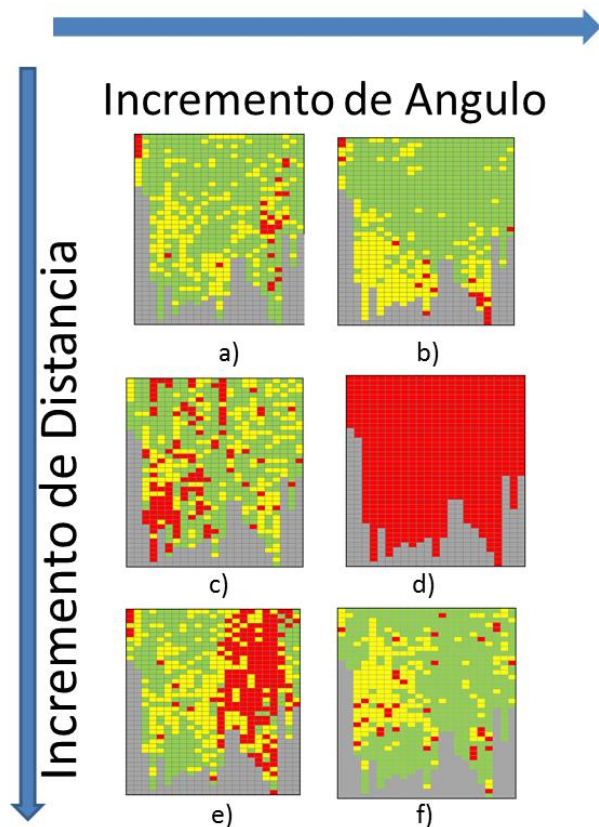


Figura 53. Comparación de los métodos de detección del centro energético por medio de mapa de colores (Cualitativo).

- a) Analog saturation and integration (saturación e integración de señal analógica).
- b) Geometric centroid (centroide geométrico).
- c) Power spectrum centroid (centroide del espectro de potencia).
- d) Rising edge (flanco de subida).
- e) Peak detection (detección de picos).
- f) Digital saturation and integration (versión digital de saturación e integración).

Tabla 4. Comparación de los métodos de detección del centro energético por medio de mapa de colores (Cuantitativo).

Método de detección del centro energético	Error>6.00°	3.00°<Error<5.99°	Error<2.99°	Orden de mejores resultados
Analog saturation and integration (saturación e integración de señal analógica)	4.10%	28.95%	66.95%	3
Geometric centroid (centroide geométrico)	2.82%	28.39%	68.79%	1
Power spectrum centroid (centroide del espectro de potencia)	17.80%	28.81%	53.39%	4
Rising edge (flanco de subida)	100%	0.00%	0.00%	6
Peak detection (detección de picos)	27.54%	34.75%	37.71%	5
Digital saturation and integration (versión digital de saturación e integración)	4.94%	26.84%	68.22%	2

Se realizó un análisis estadístico del error de medición de cada uno de los métodos para encontrar el centro energético, calculando sus parámetros de tendencia central y dispersión obteniéndose los resultados mostrados en la Figura 54 y Tabla 5, los cuales muestran que los datos no siguen un comportamiento paramétrico y por lo tanto son no paramétricos y debían ser analizados por Wilcoxon Signed Rank Test, como se realizó obteniéndose los resultados de Tabla 6.

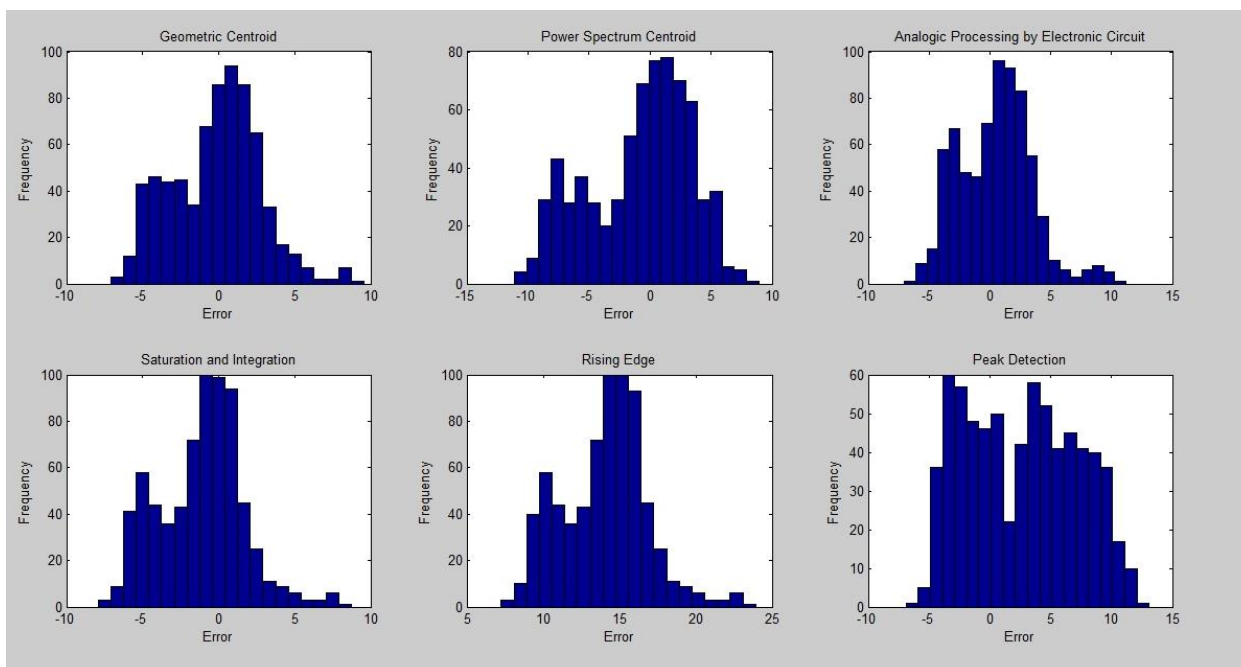


Figura 54. Distribución de frecuencia del error de los métodos de detección del centro energético

Tabla 5. Comparación de los métodos de detección del centro energético por medio de mediciones de parámetros tendencia central y dispersión.

Método de detección del centro energético	Media Aritmética	Mediana	Moda	Rango	Varianza	Desviación Estándar
Analog saturation and integration (saturación e integración de señal analógica)	0.47	0.75	1.15	18.18	9.00	3.00
Geometric centroid (centroide geométrico)	-0.15	0.17	0.07	16.67	8.50	2.92
Power spectrum centroid (centroide del espectro de potencia)	-0.82	-0.01	3.37	20.00	17.42	4.17
Rising edge (flanco de subida)	14.01	14.32	14.72	16.67	7.90	2.81
Peak detection (detección de picos)	2.6	2.62	3.99	20.00	20.68	4.55
Digital saturation and integration (versión digital de saturación e integración)	-1.16	-0.85	-0.44	16.67	7.90	2.81

Tabla 6. Comparación de los métodos de detección del centro energético por medio de Wilcoxon Signed Rank Test

Método de detección del centro energético	Parámetro p	Parámetro H	Parámetro z	Parámetro T	Orden de mejores resultados
Analog saturation and integration (saturación e integración de señal analógica)	0.00	1	-3.47	106612	3
Geometric centroid (centroide geométrico)	0.32	0	-0.99	120078	1
Power spectrum centroid (centroide del espectro de potencia)	0.00	1	-3.31	107451	2
Rising edge (flanco de subida)	0.00	1	-23.05	0	6
Peak detection (detección de picos)	0.00	1	-12.75	56005	5
Digital saturation and integration (versión digital de saturación e integración)	0.00	1	-10.06	70719	4

8.3. Selección del método de inteligencia artificial para ajuste de error.

Una base de datos fue construida con aproximadamente seis mil registros (6000 localizaciones distintas de la fuente de luz sobre la mesa óptica), para cada uno de los seis métodos de localización del centro energético. Cada base de datos conteniendo tres atributos (Angulo, Distancia y Frecuencia de Barrido) y un objetivo (Error de medición) para entrenar y probar siete algoritmos de inteligencia artificial (Neuronal Networks {NN}, Support Vector Machine Regression {SVMR}, Partial Least Squares Regression {PLSR}, Principal Components Regression {PCR}, Least absolute shrinkage and selection operator {LASSO}, Ridge Regression {RR}, Generalized Linear Models Fitting {GLMFIT}).

Los siete algoritmos fueron entrenados bajo un diseño de experimento “grid search” para seleccionar los mejores parámetros de entrenamiento para cada uno de ellos de acuerdo a su concepto y diseño y las necesidades de los datos de entrenamiento. Obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 7.

Se realizó el uso de la técnica “k-fold cross validation” para seleccionar la mejor partición de datos para realizar el entrenamiento de los algoritmos la cual consiste en particionar de manera aleatoria el conjunto de datos (dataset) en datos para entrenamiento (training data) y datos para prueba (test data). El conjunto de datos se divide en k sub-muestras de igual tamaño. Después k-1 sub-muestras se usan para entrenar el algoritmo y la última sub-muestra es utilizada para probar el algoritmo previamente entrenado. Y este proceso es repetido k-veces rotando las muestras, para seleccionar la mejor partición de datos.

Los siete algoritmos de inteligencia artificial fueron entrenados y probados con cada una de las seis bases de datos provenientes de los seis métodos para detección del centro energético de una señal optoelectrónica generada por el sistema de barrido óptico, por medio de varios experimentos computacionales en la búsqueda de los mejores parámetros y partición de datos (entrenamiento-prueba) para cada uno de los algoritmos de inteligencia artificial.

Tabla 7. Parámetros de entrenamiento para algoritmos de inteligencia artificial.

Algoritmo de Inteligencia Artificial	Parámetro	Valor del Parámetro
Neuronal Network (NN)	Hidden Layer Size	[15 15 25]
	Net.divideParam.trainRatio	70/100
	Net.divideParam.valRatio	15/100
	Net.divideParam.testRatio	15/100
	Functions type	Levenberg-Marquardt
	Performance functions type	MSE
Support Vector Machine Regression (SVMR)	NU (Fraction of objects outside the 'data tube')	2×10^{-6}
	Kernel Type	Radial
	Kernel Parameter	2
	Epsilon, with of the 'data tube'	0.1
Principal Component Regression (PCR)	Fraction of variance (< 1)	Infinite
Partial Least Square Regression (PLSR)	Number of components	2
Ridge Regression (RR)	Alpha	0.3
	Lamb	0.4
Least Absolutely Shrinkage and Seleccion Operator (LASSO)	Alpha	1
	Lamb	2.7×10^{-5}
Generalized Linear Model Fitting (GMLFIT)	Distribution	Normal

Los métodos fueron evaluados por medio del Error Cuadrático medio (MSE) como se muestra en Tabla 8, por medio del parámetro de correlación R (Regresión Lineal) como se muestra en Tabla 9, y después de un análisis estadístico, se encontró que los resultados tanto de las estimaciones de error como de las mediciones no seguían una distribución paramétrica normal, sino una distribución no paramétrica y se procedió a evaluar por medio de Wilcoxon Signed Rank Test como se muestra en Tabla 10, las predicciones de los siete algoritmos de inteligencia artificial a fin de seleccionar entre ellos el que mejor aproximación al error real lograra predecir.

Tabla 8. Evaluación de métodos de inteligencia artificial por medio del MSE

Algoritmo de Inteligencia Artificial	MSE Entrenamiento	MSE Prueba	Orden de mejores resultados
Neuronal Network (NN)	0.0907	0.0997	2
Support Vector Machine Regression (SVMR)	0.0166	0.0205	1
Principal Component Regression (PCR)	0.0987	0.0999	3
Partial Least Square Regression (PLSR)	0.1010	0.1047	4
Ridge Regression (RR)	0.1510	0.1568	6
Least Absolutely Shrinkage and Seleccion Operator (LASSO)	0.1033	0.1097	5
Generalized Linear Model Fitting (GMLFIT)	0.0987	0.0999	3

Tabla 9. Evaluación de métodos de inteligencia artificial por medio del parámetro de correlación R (PCR)

Algoritmo de Inteligencia Artificial	RCP Entrenamiento	RCP Prueba	Orden de mejores resultados
Neuronal Network (NN)	0.70537	0.70332	2
Support Vector Machine Regression (SVMR)	0.9571	0.94748	1
Principal Component Regression (PCR)	0.70537	0.70332	2
Partial Least Square Regression (PLSR)	0.69717	0.68561	4
Ridge Regression (RR)	0.70537	0.59507	3
Least Absolutely Shrinkage and Seleccion Operator (LASSO)	0.70537	0.70332	2
Generalized Linear Model Fitting (GMLFIT)	0.70537	0.70332	2

Tabla 10. Evaluación de métodos de inteligencia artificial por medio de Wilcoxon Signed Rank Test (WSRT)

Algoritmo de Inteligencia Artificial	WSRT Entrenamiento				WSRT Prueba				Orden de mejores resultados
	p	H	z	T	P	H	z	T	
Neuronal Network (NN)	0.7133	0	-0.3674	39645	0.8586	0	-0.1781	9904	2
Support Vector Machine Regression (SVMR)	0.926	1	-0.0925	40285	0.9426	1	-0.072	9991	1
Principal Component Regression (PCR)	0.7133	0	-0.3674	39645	0.8586	0	-0.1781	9904	2
Partial Least Square Regression (PLSR)	0.053	0	-1.9349	35991	0.3816	0	-0.8749	9333	4
Ridge Regression (RR)	2.53E-06	1	-4.7053	295333	7.58E-04	1	-3.3677	7290	5
Least Absolutely Shrinkage and Seleccion Operator (LASSO)	0.2546	0	-1.1392	37846	0.7483	0	-0.3209	9787	3
Generalized Linear Model Fitting (GMLFIT)	0.053	0	-1.9349	35991	0.3816	0	-0.8749	9333	4

Finalmente las mediciones de los seis métodos para localizar el centro energético de la señal optoelectrónica fueron corregidas por (42) con resultados exitosos agregándoles el error predicho por el algoritmo de inteligencia artificial SVMR a las mediciones realizadas y evaluado por Wilcoxon Signed Rank Test como se muestra en la Tabla 11.

$$\alpha_{MC} = \alpha_M + E_p \quad (42)$$

Dónde:

α_{MC} es el ángulo de medición corregido.

α_M es el ángulo medido por el sistema de barrido óptico.

E_p es el error predicho por el algoritmo inteligente.

Tabla 11. Comparación de los métodos de detección del centro energético (con ajuste de error) por medio de Wilcoxon Signed Rank Test

Método de detección del centro energético	Parámetro p	Parámetro H	Parámetro z	Parámetro T	Orden de mejores resultados
Analog saturation and integration (saturación e integración de señal analógica)	0.24	0	-1.17	119132	4
Geometric centroid (centroide geométrico)	0.62	0	-0.50	584414	2
Power spectrum centroid (centroide del espectro de potencia)	0.86	0	-0.18	124526	1
Rising edge (flanco de subida)	0.09	0	-1.68	116354	6
Peak detection (detección de picos)	0.14	0	-1.49	117398	5
Digital saturation and integration (versión digital de saturación e integración)	0.38	0	-0.87	120742	3

Finalmente se realizó una comparación entre el error en las mediciones realizadas sin la búsqueda del centro energético de la señal por (41), en las mediciones realizadas en el centro energético de la señal sin ajuste de error por (41) y en las mediciones realizadas en el centro energético de la señal con ajuste de error por (43) como se muestra en la Figura 55.

$$E_f = \alpha_{MC} - \alpha_T \quad (43)$$

Dónde:

E_f es el error predicho.

α_{MC} es el ángulo medido por el sistema corregido.

α_T es el ángulo objetivo o “target” (valor convencionalmente verdadero).

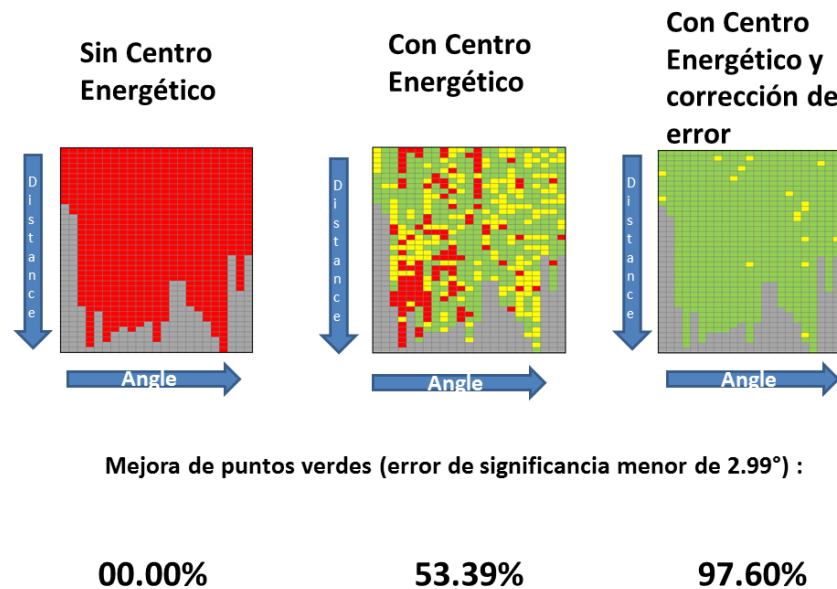


Figura 55. Comparación de mediciones iniciales y finales por medio del mapa de colores

8.4. Análisis de aumento de resolución del sistema de barrido basado en espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación.

De acuerdo al análisis de resolución desarrollado a través del capítulo V, se utilizó la ecuación (9), para evaluar el aumento de resolución del sistema de barrido basado en espejo cilíndrico con una superficie a 45° de inclinación, en las tres etapas que fue evaluado durante el desarrollo experimental: sin realizar la medición en el centro energético, realizando la medición en el centro energético y realizando la medición en el centro energético con la realización de corrección de error de medición. Se utilizó la base de datos obtenida durante el desarrollo experimental y se evaluó la ecuación (9) bajo los siguientes parámetros: $k=1$, $R=24$ hz y $\Delta\theta$ de acuerdo a los datos mostrados en la Tabla 12. Obteniéndose los resultados de resolución de la Tabla 13, la cual indica el valor de los elementos de resolución a través del barrido realizado en mesa óptica durante el desarrollo experimental.

Tabla 12. Valores de $\Delta\theta$ a través del barrido realizado en mesa óptica durante el desarrollo experimental.

	Ángulos de Barrido (°)																						
	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155
Sin Centro Energético	19	16	13	12	13	12	13	12	14	13	14	13	14	14	15	15	16	16	16	16	15	14	13
Con Centro Energético	2	1	3	6	4	4	5	3	4	4	3	2.3	3.8	2.9	2.5	2.8	3	3.5	2.7	3.1	2.4	2.6	2.7
Con Centro Energético y Corrección de Error	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.3	1.8	1.6	1	1.2	1.1	1.1	0.9	1.2	1	1.3	1.7

Tabla 13. Valores de Resolución (N) a través del barrido realizado en mesa óptica durante el desarrollo experimental

	Ángulos de Barrido (°)																						
	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155
Sin Centro Energético	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Con Centro Energético	1	3	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1.1	0.7	0.9	1	0.9	0.8	0.7	0.9	0.8	1	1	0.9
Con Centro Energético y Corrección de Error	2	2	3	3	2	3	2	3	2	2	2	1.9	1.4	1.6	2.6	2.2	2.3	2.3	2.9	2.1	2.4	1.9	1.5

CAPÍTULO IX

9. Conclusiones y trabajo a futuro

A través del desarrollo de la presente tesis se demostró la necesidad de la evaluación de la velocidad de barrido a fin de aumentar la resolución como se desarrolló en el capítulo cinco, se demostró la teoría de disminución de error y aumento de resolución al aplicar el método propuesto de obtención del centro energético de la señal optoelectrónica y su mejora al realizar el ajuste de medición por medio de la aproximación del error a través de un algoritmo de inteligencia artificial. Cabe mencionar que los seis métodos para encontrar el centro energético ofrecieron resultados aceptables, sin embargo para seleccionar el mejor de ellos fue necesario evaluarlos por medio de Wilcoxon Signed Rank Test debido a la distribución no paramétrica de los datos, resultando ser el centroide geométrico y el centroide del espectro de frecuencia los más adecuados para esta aplicación, al lograrse un obtener una reducción error y aumento de resolución.

Los resultados experimentales demostraron la efectividad de los métodos propuestos para localizar el centro energético de la señal optoelectrónica, confirmándose además que la corrección de mediciones por medio de algoritmos inteligentes mejora la precisión y aumenta el número de elementos de resolución desde $N=0.1$ hasta $N=3$, disminuyéndose el error de medición y para dar inicio al planteamiento de una nueva línea de investigación y análisis del poder de resolución, a fin de definir la resolución angular actual y la mejora en resolución angular para detectar dos o más fuentes de luz cercanas entre y por ende definir la resolución espacial, tomando como fundamento el criterio de Lord Rayleigh al analizar el fenómeno de difracción óptico Discos de Airy.

Los principios teóricos de operación, los aspectos tecnológicos y experimentales de su diseño, así como el desarrollo y validación del sistema de barrido óptico también fueron presentados fueron presentados.

Además los métodos presentados pueden ser aplicables a varios sistemas de SHM. Y es demostrado también que son una herramienta universal para varias soluciones prácticas en las distintas áreas del conocimiento.

Como trabajo futuro para dar continuidad a este proyecto se puede experimentar con dos o más fuentes emisoras de luz y aplicar los métodos aquí propuestos, además de métodos de procesamiento digital de señales para mejorar todavía más la resolución del sistema.

LISTA DE PUBLICACIONES

Revistas con Factor de Impacto

- Flores-Fuentes, W., Rivas-Lopez, M., Sergiyenko, O., González-Navarro, F. F., Rivera-Castillo, J., Hernández-Balbuena, D., & Rodríguez-Quiñonez, J. C. (2014). Combined application of Power Spectrum Centroid and Support Vector Machines for measurement improvement in Optical Scanning Systems. *Signal Processing*, 98, 37-51. ELSEVIER.
- Wendy Flores-Fuentes, Moisés Rivas-López, Oleg Sergiyenko, Julio Rodríguez-Quiñonez, Daniel Hernández-Balbuena and Javier Rivera-Castillo. Energy Centre Detection in Light Scanning Sensors for Structural Health Monitoring. Published in: *Sensors Journal*, IEEE (Volume:14 , Issue: 7). Date of Publication: July 2014. Page(s): 2355 - 2361. ISSN: 1530-437X. Digital Object Identifier: 10.1109/JSEN.2014.2310224.

Patentes

- Dr. Oleg Sergiyenko, Dra. Vira Tyrsa, Dr. Moisés Rivas López, Dr. Daniel Hernández Balbuena, Dr. Julio Cesar Rodríguez, Quiñonez, Dr. Luis Carlos Bassaca Preciado, MI Wendy Flores Fuentes. Sistema Óptico de triangulación dinámica para la medición de ángulos y coordenadas en un espacio tridimensional. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. 2013.

Capítulos de Libro

- M. Rivas Lopez, W. Flores Fuentes, J. Rivera Castillo, O. Sergiyenko, and D. Hernández Balbuena, Chapter: A Method and Electronic Device to Detect the Optoelectronic Scanning Signal Energy Centre". Book: *Optoelectronics - Advanced Materials and Devices*. Edited by Sergei L. Pyshkin and John M. Ballato. Croatia: In Tech, 2012, pp.1 - 30, (in Europe). ISBN. 978-953-51-0922-8.
- Wendy Flores-Fuentes, Moisés Rivas-López, Oleg Sergiyenko, Julio C. Rodríguez-Quiñonez, Daniel Hernández-Balbuena, and Javier Rivera- Castillo. Accuracy Enhancement OF A SHM System by Light Scanning Sensor Improvement. *Transactions on Engineering Technologies - Special Volume of the World Congress on Engineering and Computer Science 2013*. Published by Springer. Book ID: 323287_1_En. Book ISBN: 978-94-017-9114-4. Chapter No.: 12

Memorias de Congreso

- Flores-Fuentes, W., Rivas-López, M., Sergiyenko, O., Rivera-Castillo, F. G. N. J., & Hernández-Balbuena, D. (2013). Digital Signal Processing on Optoelectronic for SHM. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science* (Vol. 1).
- Flores-Fuentes, W., Rivas-López, M., Sergiyenko, O., Rivera-Castillo, J., & Hernández-Balbuena, D. (2013). Analog Signal Processing in Light Scanning Sensors for Structural Health Monitoring Accuracy Enhancement. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science* (Vol. 2).
- W. Flores Fuentes, M. Rivas López, O. Sergiyenko, and J. Rivera Castillo, "Comparison of signal peak detection algorithms in the search of the signal energy center for measuring with optical scanning," in Proc. IEEE Section Mexico, IEEE ROC&C2011:XXII autumn international conference on communications,

computer, electronics, automation, robotics and industrial exposition, Guerrero, Mexico, Jan. 2011, CP10,PON15.

- Wendy Flores-Fuentes, Julio C. Rodríguez-Quiñonez, Daniel Hernández-Balbuena, Moisés Rivas-López, Oleg Sergiyenko, Félix F. González-Navarro, and Javier Rivera-Castillo. Machine Vision supported by Artificial Intelligence. Applied to Rotatory Mirror Scanners. International Symposium on Industrial ISTANBUL 2014. IEEE.
- Moisés Rivas-López, Wendy Flores-Fuentes, Oleg Sergiyenko, Javier Rivera-Castillo, Julio C. Rodríguez-Quiñonez, Daniel Hernández-Balbuena, Jorge L. Taddei-Bringas, Scanning for Light Detection and Energy Centre Localization Methods Assesment in Vision Systems for SHM. . International Symposium on Industrial ISTANBUL 2014. IEEE.
- Javier Rivera-Castillo, Wendy Flores-Fuentes, Moisés Rivas-López, Oleg Sergiyenko, Daniel Hernández-Balbuena, Julio C. Rodríguez-Quiñonez, Jesus A. Platt-Carrillo. Structural Health Monitoring Based on Optical Scanning Systems and SVM. Applied to Rotatory Mirror Scanners. International Symposium on Industrial ISTANBUL 2014. IEEE.

REFERENCIAS

- Allen D.W., Park G., Farrar C.R. (2005) Overview of Wireless Active Sensing Systems for Structural Health Monitoring, Structural Health Monitoring, Advancements and Challenges for Implementation, Fu Kuo Chang(ed.), DEStech publications inc., Lancaster, Pennsylvania, U.S.A., 2005, pp. 1578-1585.
- Aubert, D., Millier, P., & Painsavoine, M. (2002). Geometric deformation measurement and correction applied to dynamic streak camera images. *Measurement Science and Technology*, 13(12), 1910.
- Bass, M. (1995). *Handbook of optics*. Vol. 2, Devices, measurements, and properties. McGraw-Hill.
- Bass, M., DeCusatis, C., Enoch, J., Lakshminarayanan, V., Li, G., Macdonald, C., ... & Van Stryland, E. (2009). *Handbook of Optics, Volume I: Geometrical and Physical Optics, Polarized Light, Components and Instruments (set)*. McGraw-Hill, Inc.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., & García, J. A. G. J. (1990). *Mecánica vectorial para ingenieros*. McGraw-Hill.
- Boardman, J. D., Boyd, J. R., & Welch, J. P. (1995). *U.S. Patent No. 5,392,149*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Boni Fabio (2005), What is the difference between PSD and CCD sensor technology?, FA-SEP. http://www.fasep.it/english/support/tech_talks/tt013_psd%20and%20ccd.asp. Accessed 20 Jun (2012).
- Bosch, T., & Donati, S. (2001). Distance and Displacement Measurements by Laser Technique. *Optical Engineering*, 40(1), 8-9.
- Burr-Brown, Corporation. (1994). P. D., S-12, , 199, B., & , O. P. OPT301. Integrated photodiode and amplifier datasheet.
- Cazzolato, B., Wildy, S., Codrington, J., Kotousov, A., & Schuessler, M. (2008). Scanning laser vibrometer for non-contact three-dimensional displacement and strain measurements. In *Proceedings of the Australian Acoustical Society Conference*, Geelong, Australia, Nov 24 (Vol. 26).
- Chaumette, F., & Hutchinson, S. (2006). Visual servo control. I. Basic approaches. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 13(4), 82-90.
- Chintalapudi, K., Fu, T., Paek, J., Kothari, N., Rangwala, S., Caffrey, J., ... & Masri, S. (2006). Monitoring civil structures with a wireless sensor network. *Internet Computing, IEEE*, 10(2), 26-34.
- Choi, J. K., Park, S. H., Cho, D. J., & Seo, K. Y. (2008). Correction error generation algorithm for differential positioning performance analysis of navigation equipment. In *Control, Automation and Systems*, 2008. ICCAS 2008. International Conference on (pp. 1099-1103). IEEE.
- Cristina, F., Dapoto, S. H., Vegas, J., Artola, V., Russo, C. C., & Abásolo Guerrero, M. J. (2007). Desarrollo de un escáner 3D mediante cámaras estereoscópicas e iluminación láser. In *XIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*.
- Dai, L., Wang, J., Rizos, C., & Han, S. (2001). Applications of Pseudolites in Deformation Monitoring Systems. In *10th FIG Symposium on Deformation Measurements* (pp. 19-22).
- Da Silva, S., Dias Júnior, M., Lopes Junior, V., & Brennan, M. J. (2008). Structural damage detection by fuzzy clustering. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(7), 1636-1649.
- De Silva, G. M. S. M. S. (2012). *Basic Metrology for ISO 9000 Certification*. Routledge.
- Diosi, A., & Kleeman, L. (2005, August). Laser scan matching in polar coordinates with application to SLAM. In *Intelligent Robots and Systems*, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 3317-3322). IEEE.
- Duma, V. F. (2007). Mathematical and Experimental Analysis of the Polygon Scanners.
- El-Kafrawy, A. (2011). Crack detection by modal analysis in 3D beams based on FEM. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 7(4), 265-282.
- Emerson, W. H. (2005). Differing angles on angle. *Metrologia*, 42(4), L23.
- Esquivel, A., Lazarian, A., Horibe, S., Cho, J., Ossenkopf, V., & Stutzki, J. (2007). Statistics of velocity centroids: effects of density-velocity correlations and non-Gaussianity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 381(4), 1733-1744.
- Esténo V.J. (2011). Estudio sobre las aplicaciones industriales del láser. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza.

- Everlight, Electronics., Co., Ltd, (2005). D. P., & T-03305, PT334-6C. Technical data sheet 5mm phototransistor T-1 3/4.
- Fischer, R. E., Tadic-Galeb, B., Yoder, P. R., & Galeb, R. (2000). Optical system design.
- Forman, P., & Parry, I. (2001). Rapid data collection at major incident scenes using three dimensional laser scanning techniques. In *Security Technology, 2001 IEEE 35th International Carnahan Conference on* (pp. 60-67). IEEE.
- Fotiou, A., Kagiadakis, V., Pikridas, C., & Rossikopoulos, D. (2003). Geodetically derived displacements and crustal deformation analysis: Application in the Volvi area. In *11 th FIG Symposium on Deformation Measurements, Greece, Santorini*.
- Franca, J. G. D., Gazziro, M. A., Ide, A. N., & Saito, J. H. (2005). A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view. In *Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. I-425). IEEE.
- Garcia, D., & Orteu, J. J. (2001). 3D deformation measurement using stereo-correlation applied to experimental mechanics. In *Proceedings of 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, USA*.
- Gordon, S., Lichti, D., Franke, J., & Stewart, M. (2004). Measurement of structural deformation using terrestrial laser scanners. In *Proc. Of 1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering, Nottingham, UK* (Vol. 28).
- Gascón-Moreno, J., Ortiz-García, E. G., Salcedo-Sanz, S., Paniagua-Tineo, A., Saavedra-Moreno, B., & Portilla-Figueras, J. A. (2011). Multi-parametric gaussian kernel function optimization for ϵ -SVMr using a genetic algorithm. In *Advances in Computational Intelligence* (pp. 113-120). Springer Berlin Heidelberg.
- Griffin, B., & Connelly, M. J. (2004). Digital signal processing of interferometric fiber optic sensors. In *Lightwave Technologies in Instrumentation and Measurement Conference, 2004. Proceedings of the* (pp. 153-156). IEEE.
- Griot, M. (1988). optics Guide 4.
- Grum, J. (2009). Book Review: *Laser Fundamentals*, by William T. Silfvast. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 4(3), 393-394.
- Gunn, S. R. (1998). Support vector machines for classification and regression. *ISIS technical report*, 14.
- Handbook of Optical and Laser Scanning*. (2004). Edited by Gerald F. Marshall, 769 p., ISBN: 0-8247-5569-3, Marcel Dekker, Inc., New York – Basel, 2004.
- Harris, E.D. and Wilson, J.M. (1995). US Patent N 5455708, pp 15, October 3.
- Hernández, B. D., Rivas, L. M., Burtseva, L., Sergiyenko, O., & Tyrsa, V. (2006). Method for phase shift measurement using farey fractions. In *Electronics and Photonics, 2006. MEP 2006. Multiconference on* (pp. 181-184). IEEE.
- Herring T.A., *The Global Positioning System*, Scientific American, 1996 pp. 32-38.
- Hong, H., Wang, X. L., Tao, Z. Y., & Du, S. P. (2011). Centroid-based sifting for empirical mode decomposition. *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, 12(2), 88-95.
- Franco, J. M., Gómez, D., Hernán Murcia, J., Thomson, P., & Marulanda, J. (2011). Development and implementation of a laser system for dynamic characterization and displacement measurement of civil structures. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (60), 170-181.
- Jung, R. (1998). Image sensor technology for beam instrumentation (No. CERN-SL-98-061-BI).
- Kathirvel, P., Manikandan, M. S., Prasanna, S. R. M., & Soman, K. P. (2011). An efficient R-peak detection based on new nonlinear transformation and first-order Gaussian differentiator. *Cardiovascular Engineering and Technology*, 2(4), 408-425.
- Kennedy, W. P. (1998). The basics of triangulation sensors. *Sensors-the Journal of Applied Sensing Technology*, 15(5), 76-83.
- Kihara, M., & Ohno, H. (2003, June). Distributed optical fiber sensor using Brillouin scattering. In *Lasers and Electro-Optics, 2003. CLEO'03. Conference on* (pp. 2-pp). IEEE.
- Lai, X. Z., Yang, S. X., Zeng, G. X., She, J. H., & Wu, M. (2007). New distributed positioning algorithm based on centroid of circular belt for wireless sensor networks. *International Journal of Automation and Computing*, 4(3), 315-324.
- Lavelle, J. P., Schuet, S. R., & Schuet, D. J. (2004, February). High-speed 3D scanner with real-time 3D processing. In *Photonics Technologies for Robotics, Automation, and Manufacturing* (pp. 179-188). International Society for Optics and Photonics.
- Lazarian, A. (2009). Obtaining spectra of turbulent velocity from observations. In *From the Outer Heliosphere to the Local Bubble* (pp. 357-385). Springer New York.

- Lee, C. W., Zhang, X. M., Tjin, S. C., & Liu, A. Q. (2003). Nano-scale displacement measurement of MEMS devices using fiber optic interferometry. In *Proceedings of SPIE* (Vol. 5145, pp. 196-201).
- Leng J.S., Du S.Y., Winter D., Barner R.A. Mys G.C. and Fernando G.F. (2005). Structural Strain Monitoring Of Smart Civil Structure Using Fibre Optic Sensor, publicado en *Structural Health Monitoring, Advancements and Challenges for Implementation*, Fu Kuo Chang(ed.), DEStech publications inc., Lancaster, Pennsylvania, U.S.A., 2005, pp. 331-339.
- López, M. R., Sergiyenko, O., & Tyrsa, V. (2008). Machine vision: approaches and limitations. *Computer vision*, 395-428.
- Lyashuk, V. I., & Novikov, E. G. (2006). Search for acoustic effects from extensive atmospheric showers in Baikal. *Physics of Atomic Nuclei*, 69(11), 1922-1929.
- Marshall, G. F. (Ed.). (1985). *Laser Beam Scanning: Opto-Mechanical Devices, Systems and Data Storage Optics* (Vol. 8). CRC Press.
- Massari, N., Gonzo, L., Gottardi, M., & Simoni, A. (2002). High speed digital CMOS 2D optical position sensitive detector. In *Solid-State Circuits Conference, 2002. ESSCIRC 2002. Proceedings of the 28th European* (pp. 723-726). IEEE.
- Mathworks (2012). Neural Network Toolbox. <http://www.mathworks.com/products/datasheets/pdf/neural-network-toolbox.pdf>
- Mathworks (2013). Partial Least Squares Regression and Principal Components Regression. <http://www.mathworks.com/products/statistics/examples.html;jsessionid=55014b942a0820ca4034bc624536?file=/products/demos/shipping/stats/plspcrdemo.html>
- Mehta, V., & El Zarki, M. (2004). A bluetooth based sensor network for civil infrastructure health monitoring. *Wireless Networks*, 10(4), 401-412.
- National Instruments. (2006) Peak Detection Using LabView and Measurement Studio. Developer Zone.. Tutorial Published date Dec 6, 2006. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3770>.
- National Instruments., (2009). Wavelet-Based Peak Detection. Developer Zone. Tutorial Published date Jul 31, 2009. www.ni.com.
- Park, T. H. (2009). Introduction to digital signal processing: computer musically speaking. World Scientific.
- Peng-Hsiang Weng & Fu-Jen Kao. (2004). Modulation Based Time Resolved Laser Scanning Microscopy. The Second Asian and Pacific Rim Symposium on Biophotonics, APBP 2004, pp.97- 98, ISBN: 0-7803-8676-0, december 2004.
- Petrov, M.; Talapov, A.; Robertson, T. Lebedev, A.; Zhilyaev, A. & Polonskiy, L. (1998). Optical 3D Digitizers: Bringing Life to the Virtual World. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol., 18, (May/Jun 1998), page numbers (28-37). Issue: 3, ISSN: 0272-1716.
- Pérez-Cruz, F., & Bousquet, O. (2004). Kernel methods and their potential use in signal processing. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 21(3), 57-65.
- Pierce, D.S.; Ng, T.S. & Morrison, B.R. (1992). A Novel Laser Triangulation Technique for High Precision Distance Measurement, *Proceeding of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol.2, pp. 1762-1769, USA, october, 1992, Houston.
- Pozo-Ruz, A., Ribeiro, A., García-Alegre, M. C., García, L., Guinea, D., & Sandoval, F. (2000). Sistema de Posicionamiento Global (GPS): Descripción, Análisis de Errores, Aplicaciones y Futuro. *Mundo Electrónico*, Febrero.
- Player J. Slade J., Kristoff S.B, Kokkins J., Lusigne R. and Livingston R, Fiber Optic Sensor for Situ In Measurement Of Relative Humidity in Concrete, (2005). *Structural Health Monitoring, Advancements and Challenges for Implementation*, Fu Kuo Chang(ed.), DEStech publications inc., Lancaster, Pennsylvania, U.S.A., 2005, pp. 340-348.
- Proffitt, D. R., & Cutting, J. E. (1979).. Perceiving the centroid of configurations on a rolling wheel. *Perception & Psychophysics*, 25(5), 389-398.
- Rieke, George. (2002). *Detection of Light: From the Ultraviolet to the Sub millimeter*. Optical detectors. Publisher: Cambridge University Press. West Nyack, NY, USA. eISBN: 978113948351. pISBN: 9780521816366.
- Rivara, M. C., & Calderon, C. (2010). Lepp terminal centroid method for quality triangulation. *Computer-Aided Design*, 42(1), 58-66.
- Rivas Lopez M, Sergiyenko O, Tyrsa V, Hernandez Perdomo W, Devia Cruz L, Hernandez Balbuena D, Burtseva L, Nieto Hipolito J (2010) Optoelectronic method for structural health monitoring. *Structural Health Monitoring* 9(2):105-120.

- Rivas L. Moisés, Sergiyenko Oleg, And Tyrsa Vera, Machine Visión: Approaches and Limitations, Computer Vision Book, ISBN9789537619-21-3, Viena Austria, 2008, pp396-428.
- Ruiz, L. (2010). Contraste en la ejecución de auscultaciones geodésicas por métodos clásicos y con láser escáner. Rutledge, D., Gnipp, J., & Kramer, J. (2001, March). Advances in real-time GPS deformation monitoring for landslides, volcanoes, and structures. In Proceedings of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, March (pp. 19-22).
- Sánchez-Garnica, F. J. E. (2003). Introducción a los sistemas de medición tridimensional con láser. Autocad magazine, (83), 48-50.
- Schaefer, P., Williams, R. D., Davis, G. K., & Ross, R. A. (1998). Accuracy of position detection using a position-sensitive detector. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 47(4), 914-919.
- Shinoda, K., & Inoue, N. (2013). Reusing Speech Techniques for Video Semantic Indexing [Applications Corner]. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 30(2), 118-122.
- Schuhmann, S., Herrmann, K., Rothermel, K., Blumenthal, J., & Timmermann, D. (2008). Improved weighted centroid localization in smart ubiquitous environments. In *Ubiquitous Intelligence and Computing* (pp. 20-34). Springer Berlin Heidelberg.
- Sebastiano Battiato. Arcangelo Ranieri Bruna. Giuseppe Messina. Image Processing for Embedded Devices. (2010). Bentham Science Publisher. Sharjah, UAE.
- Sekey, A., & Hanson, B. A. (1984). Improved 1-Bark bandwidth auditory filter. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 75, 1902.
- Sergiyenko, O., Hernandez, W., Tyrsa, V., Cruz, L. F. D., Starostenko, O., & Peña-Cabrera, M. (2009). Remote sensor for spatial measurements by using optical scanning. *Sensors*, 9(7), 5477-5492.
- Silfvast, W. T. (2004). *Laser fundamentals*. Cambridge University Press.
- Surmann, H.; Lingemann, K.; Nuchter, A. & Hertzberg, J. (2003). A 3D laser range finder for autonomous mobile robots. Robotics and Autonomous Systems, Issues 3-4, vol. 45, pp. 181-198, december 2003
- Texas, Instruments. S. O. C., S0, , & , D. (2003). TC281.X1010-Pixel CCD image sensor datasheet., 1036.
- Theuwissen, A. J. (1995). *Solid-state imaging with charge-coupled devices* (Vol. 1). Springer.
- Tibshirani, R. (1996). Regression shrinkage and selection via the lasso. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 267-288.
- Trevor. Hastie, Robert. Tibshirani, & Friedman, J. J. H. (2001). *The elements of statistical learning* (Vol. 1). New York: Springer.
- Tyrsa Valentin, Burtseva Larisa, Rivas López Moisés, Tyrsa Vera, Monitoring of Civil Engineering Structures, Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems III, Editor: TribikranKundu, March, 2004, San Diego CA., USA, pp485-492.
- Van Oijen, A. M., Köhler, J., Schmidt, J., Müller, M., & Brakenhoff, G. J. (1998). 3-Dimensional super-resolution by spectrally selective imaging. *Chemical Physics Letters*, 292(1), 183-187.
- Wang, H., & Fan, M. (2010). Centroid-based semi-fragile audio watermarking in hybrid domain. *Science China Information Sciences*, 53(3), 619-633.
- Werner Lienhart, Fritz K. Brunner. (2003). Monitoring of Bridge Deformations Using Embedded Fiber Optical Sensors. Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece.
- Zhang, Z. (2008, January). Some recent progresses in network error correction coding theory. In *Network Coding, Theory and Applications, 2008. NetCod 2008. Fourth Workshop on* (pp. 1-5). IEEE.

ANEXOS