IMPLEMENTACION DE SENSORES LÁSER PARA MEDIR DESPLAZAMIENTOS EN ESTRUCTURAS

JEAN MICHEL FRANCO L.
Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad del Valle. Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7. Universidad del Valle, Cali, Colombia.

JORGE HERNAN MURCIA A.
Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad del Valle. Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7. Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Esp., DANIEL GÓMEZ
Ingeniero Civil, Especialista en Estructuras, Universidad del Valle, Colombia. Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7. Profesor Auxiliar, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Ph.D, PETER THOMSON
Doctor en Ingeniería Aeroespacial, Universidad de Minnesota, USA. Director Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7. Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

RESUMEN: El monitoreo estructural es una técnica con la cual se miden cambios en estructuras con el fin de detectar daños. Esto se puede realizar con diversos instrumentos tales como: Acelerómetros, Strain gauges, Anemómetros, LVDT´s, etc. Los más utilizados para medir vibraciones producidas por cargas dinámicas (sismo, viento, tránsito peatonal y de automóviles, etc.) son los acelerómetros, los cuales miden las aceleraciones absolutas de la estructura que al ser integradas dos veces para encontrar los desplazamientos, incurren en grandes errores debido al algoritmo numérico. Con el fin de solucionar esto, se está investigando actualmente la medición de desplazamientos mediante sensores láser los cuales además de medir deformaciones ante cargas dinámicas tienen la posibilidad de medir deformaciones ante cargas estáticas. La investigación y desarrollo de los sensores láser se basa en técnicas de procesamiento digital de imágenes y visión artificial con las cuales se procesan imágenes que contienen información de la posición del puntero láser en la estructura. En este artículo se muestra el sistema de sensores láser desarrollado experimentalmente y se comparó con un LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) ubicado en una mesa vibratoria uniaxial obteniendo resultados similares.

ABSTRACT: *Structural monitoring is a technique for measuring changes in structures to detect damages. This can be done with various instruments, such as accelerometers, Strain Gauges, Wind Gauges etc. Accelerometers are often used for measuring absolute accelerations produced by dynamic loads (earthquakes, pedestrian and automobile traffic, etc). When these accelerations are integrated twice to find displacements, large errors are induced due to the numerical algorithm.*

In order to overcome the latter, there is an increasing interest in measuring displacements induced by both dynamic and static loading through laser sensors. Research and development of laser sensors are based on digital image processing and machine vision techniques, and aim at processing images containing information about the position of the laser pointer on the structure. This paper describes the development of a laser sensor system. The system was used for measuring displacements on a shaking table and the records were compared with measurements taken with an LVDT (Linear Variable Displacement Transducer). An analysis showed a superior performance of the laser sensors.

Nomenclatura:

A	Matriz para identificación del puntero láser
i	Índice de la matriz **A** (Filas)
j	Índice de la matriz **A** (Columnas)
p	Número de Filas de **A**
q	Número de Columnas de **A**
ω	Frecuencia Natural
ζ	Razón de Amortiguamiento
n	Numero de Marcos
β	Factor de correspondencia
ε	Índice de umbralización

1. INTRODUCCION

Las técnicas de visión artificial cubren un campo de aplicación muy extenso, que va desde aplicaciones en medicina [1] hasta aplicaciones para astronomía. Una de las aplicaciones es la implementación de éstas técnicas a la ingeniería civil para el caso de la medición de desplazamientos a través del tiempo, el cual siempre ha sido una dificultad en estructuras. La implementación de este sistema da lugar a una forma económica que en cierto caso pueda llegar a reemplazar los acelerómetros debido a su alto costo.

Los sensores láser se basan en el reconocimiento de la posición de un puntero láser en una pantalla, el cual representa la posición en ese instante de la estructura (ver Figura 1). El reconocimiento se logra mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes, entre las cuales se destacan la umbralización, ecualización del histograma y el filtrado [2], por las cuales se logra analizar las imágenes para una identificación óptima del puntero láser.

Mediante este método de medición de desplazamientos se han obtenido buenos resultados al comparar estos datos con registros de aceleraciones y registros de desplazamientos obtenidos mediante un LVDT.

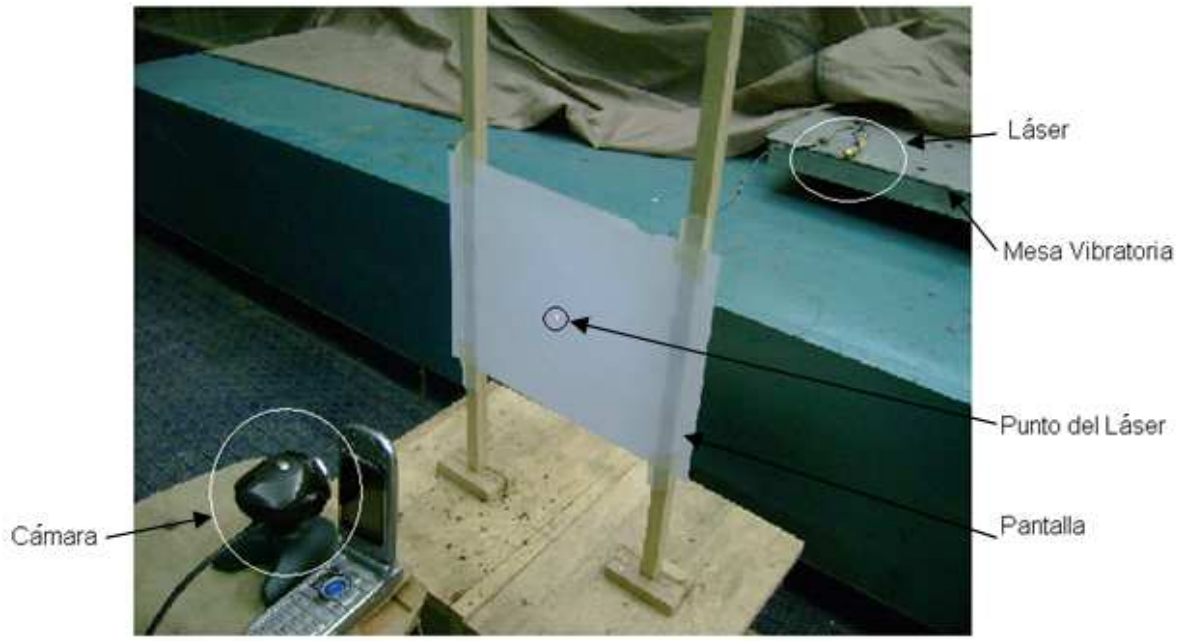

Figura 1. Ubicación del láser y la cámara

Este desarrollo se limita a movimientos paralelos a la pantalla por lo cual se pueden encontrar desplazamientos en los ejes X y Y además de rotaciones respecto a un eje perpendicular a estos (Z) con una frecuencia de adquisición dependiente de la cantidad de marcos (imágenes) por segundo capturados por la cámara y una unidad mínima de medida dependiente de la resolución de ésta.

Este tipo de estudio representa un avance en el área de monitoreo estructural ya que es aplicable a la medición y monitoreo de desplazamientos en grandes estructuras por la ventaja de no requerir contacto directo con ésta como el caso de los LVDT. Otra ventaja de los sensores láser es que no necesitan largos tramos de cableado, como es el caso de la instrumentación mediante acelerómetros.

2. METODOLOGIA

La videogrametria es utilizada para reconocer y realizar mediciones en secuencias de imágenes capturadas por la cámara. La esencia de ésta es analizar cada marco (imagen) y comparar el resultado del análisis de cada imagen con una de referencia inicialmente procesada.

Una de las ventajas que se tiene al medir desplazamientos mediante esta técnica es que no se requiere contacto directo con la estructura, ya que el láser se proyecta sobre una pantalla donde una cámara captura una secuencia de imágenes sobre ésta; el resultado es un video en donde se observa el movimiento de la proyección del láser. Este movimiento registrado en la pantalla es el movimiento que se está produciendo en la estructura.

2.1 Calibración de la medida

Es necesario realizar una medida de correspondencia entre el número de pixeles y una distancia conocida para lograr una relación entre pixeles y unidades de longitud (por ejemplo Centímetros, Milímetros, etc). Para esto se busca obtener un *Factor de Correspondencia (β)*, las unidades de esta constante serán en pixel/centímetro o pixel/milímetro según los requerimientos y el sistema de medición, y será a su vez función de la resolución de la cámara y la distancia entre la cámara y la pantalla.

La medición de esta constante se realiza agregando dos marcas a la pantalla separadas por una distancia dada, para luego capturar esa imagen y medir la distancia en pixeles de estas dos marcas. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de medición del Factor de Correspondencia (β).

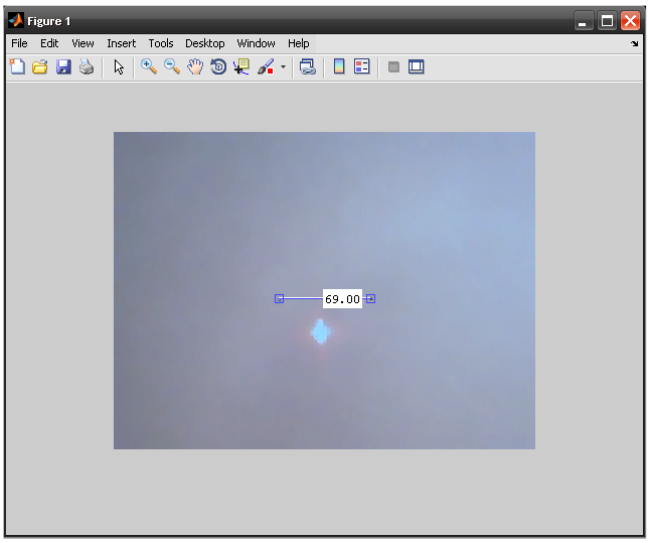

Figura 2. Medición del Factor (β)

2.2 Seguimiento del puntero láser e identificación de desplazamiento

Para realizar un seguimiento e identificación óptima del desplazamiento, lo que se busca es capturar una escena lo más simple posible; a esto se atribuye el uso de una pantalla con fondo blanco, con el fin resaltar la imagen del puntero láser. Cada imagen adquirida debe ser pre-procesada antes de identificar el desplazamiento, para lo cual se utilizan las siguientes técnicas:

2.2.1 Procesamiento de la Señal.

Una señal de video es una señal matricial estructurada en donde el primer componente es la distribución en X y Y de la imagen, la siguiente componente es el identificador de los tres planos de color de la señal y el tercer componente es un número de identificación asociado a cada imagen (ver Figura 3). Complementariamente se tiene otra señal de tiempo en donde cada dato es el tiempo asociado a cada imagen de la señal de video.

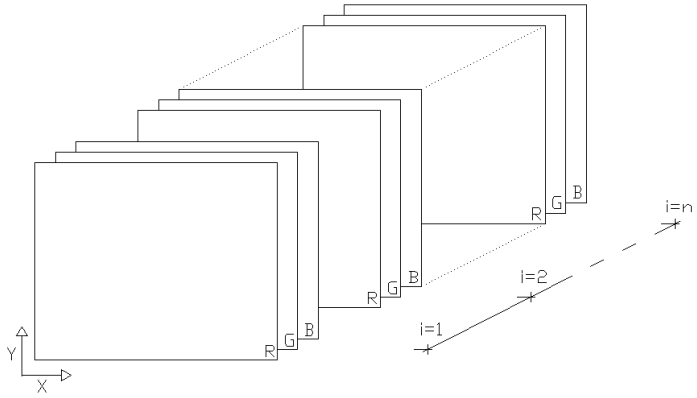

Figura 3. Esquema de una Señal de Video

Debido a que esta señal no tiene ningún tratamiento previo de compresión de imágenes, la cantidad de datos es considerable debido a que la captura de 30 segundos de video genera un tamaño de datos de aproximadamente 64 Mb capturando a 30 imágenes por segundo (30 FPS). Para disminuir el tamaño del registro sin perder información necesaria, se realiza un tratamiento previo para eliminar los planos de color G y B (verde y azul, respectivamente) los cuales proveen poca información de la posición del puntero. Trabajando sólo con el plano R (rojo) de la imagen el cual contiene la información del puntero debido a la coloración rojiza dada por la longitud de onda del láser (aprox. 653nm) [3].

Debido a las condiciones de luz puede haber aporte de información sobre el puntero en los planos G y B; cuando se tiene esta condición, lo más adecuado es realizar una conversión de estos tres planos (RGB) a tonos de grises conservando la información de los tres planos en un solo plano de tonos de grises.

Para agilizar el procesamiento de todos los marcos debido a la gran cantidad de datos, se puede utilizar lo que se denomina regiones de interés, ROI´s (Regions of Interest) para lo cual sólo se procesa una zona de la imagen en donde se está presentando el movimiento. De esta manera este estudio se puede proyectar para monitorear varios puntos de la estructura dirigiendo varios lásers a una misma pantalla y seleccionando varias ROI´s para cada láser (ver Figura 4).

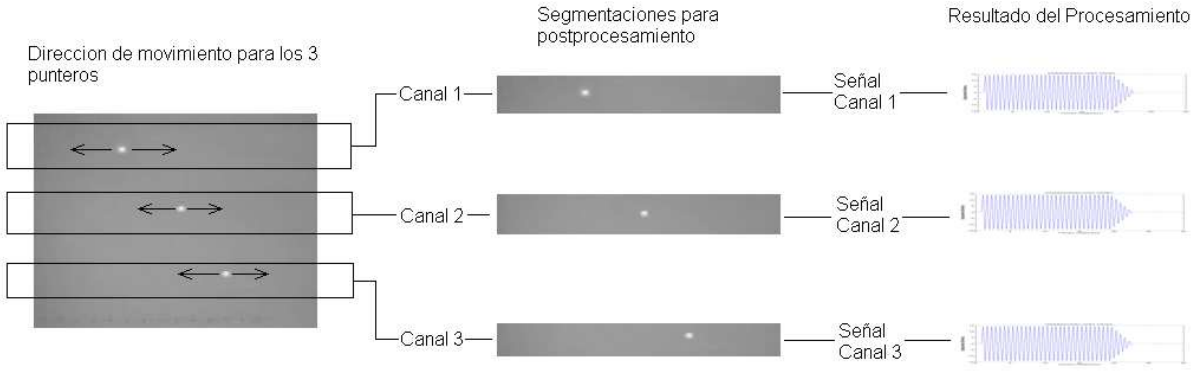

Figura 4. Esquema de monitoreo para varios lásers

Una vez se tiene la señal filtrada se procede al análisis y a la identificación del puntero mediante las siguientes técnicas:

2.2.2 Ecualización del Histograma

La ecualización del histograma de una imagen es una transformación que pretende obtener para una imagen un histograma con una distribución uniforme. Es decir, que exista el mismo número de pixeles para cada nivel de gris del histograma de una imagen monocromática. Esta técnica se aplica sobre el histograma acumulado de la imagen para darle una forma normalizada la cual mejora el contraste de la imagen automáticamente.

2.2.3 Umbralización

La umbralización es una técnica comúnmente utilizada para extraer información específica de una imagen, esta técnica consiste en dar un rango límite que represente la información que se requiera, eliminando toda información que no esté en ese rango permitiendo observar únicamente el objeto de interés. El proceso de umbralización se puede automatizar al identificar el mayor valor de la matriz *A* (Matriz para identificación del puntero láser), este valor es una constante definida como el Índice de Umbralización (ε) desde el cual se define un rango de umbralización en donde se espera estén los valores del puntero láser en la matriz *A*. A este rango se le asigna un valor de 1 y a lo que no pertenezca a este rango se le asigna un valor de 0 obteniendo una imagen binaria en donde sólo se encuentra el puntero láser.

Figura 5. Imagen binaria

2.2.4 Desplazamientos

Una vez se tiene una imagen binaria se puede encontrar la posición del puntero mediante la siguiente formulación tomada de [4].

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q} j \times \mathbf{A}(i,j)}{\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q} \mathbf{A}(i,j)} ; \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q} i \times \mathbf{A}(i,j)}{\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{q} \mathbf{A}(i,j)} \quad (1)$$

En donde *p* y *q* son el número de filas y columnas respectivamente de la matriz A. *i*, *j* son los subíndices de la misma. Se puede observar que la ecuación (1) representa el centroide de la imagen.

2.3. Descripción de los ensayos realizados

Se realizaron 4 ensayos en la mesa vibratoria uniaxial de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle. En el primer ensayo se sometió un pórtico a un desplazamiento inicial para luego liberarlo y dejarlo en estado de vibración libre, donde los sensores comparados fueron el láser y el LVDT. En el segundo ensayo se comparó la señal obtenida mediante el láser y un acelerómetro colocados en el pórtico de la prueba anterior sometido a un ensayo de vibración libre. En el tercer ensayo se compararon los desplazamientos obtenidos mediante el láser y un LVDT directamente sobre el simulador sísmico para una señal de excitación senosoidal a una frecuencia fija. El cuarto ensayo consistió en la misma configuración que el anterior pero con una señal de excitación tipo barrido de frecuencias entre 1Hz y 10Hz.

Estos ensayos fueron realizados utilizando una cámara con una frecuencia de adquisición de 30 marcos por segundo (FPS) y una resolución de 320x240 pixeles según datos del fabricante, además se utilizó un puntero láser con longitud de onda aproximadamente igual a 635nm y un poder de salida de 3mW.

2.3.1 Ensayo de vibración libre: LVDT Vs Sensor Láser

Se instaló un pórtico en la mesa vibratoria y se le aplicó un desplazamiento inicial, para después liberarlo con el objetivo de monitorearlo en vibración libre. En este ensayo se obtuvo dos registros: uno de desplazamientos mediante LVDT y otro de desplazamientos mediante Sensor Láser. Posteriormente se identificó la frecuencia natural de la estructura y la razón de amortiguamiento de ésta (ζ), tanto para el registro brindado por el Sensor Láser como para el registro del LVDT, finalmente se compararon estos resultados.

El montaje del ensayo es el siguiente:

Figura 6. Ensayo de vibración libre

La instrumentación del pórtico se implementó en el nivel superior de este (ver Figura 7), tomando como sistema de referencia un pórtico muy rígido al cual se le instaló el LVDT para medir los desplazamientos en la estructura sometida a vibración libre.

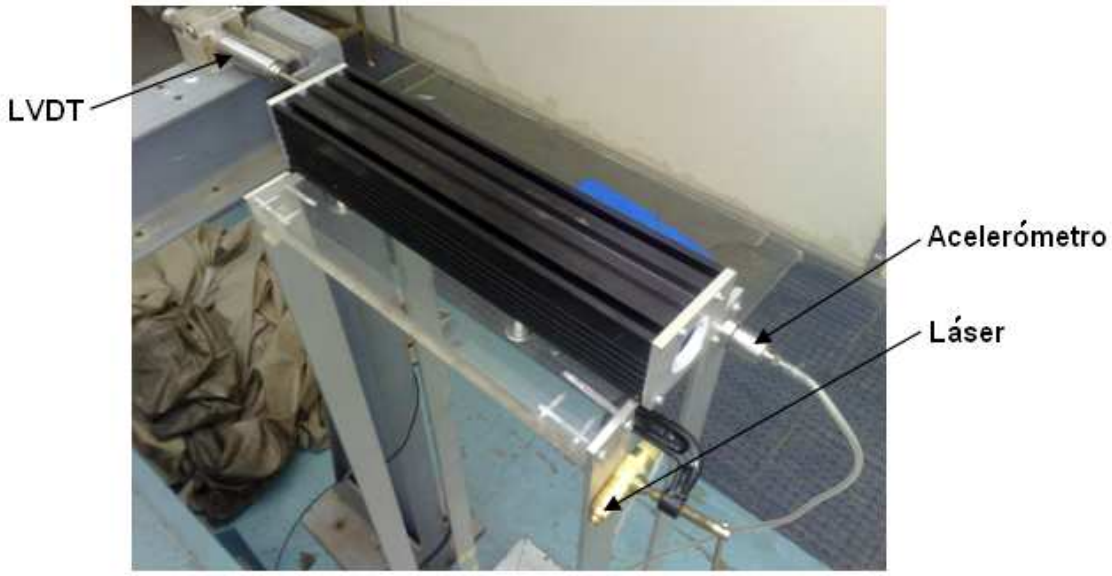

Figura 7. Instrumentación para ensayos de vibración libre

2.3.2 Ensayo de vibración libre: Acelerómetro Vs Sensor Láser

Se realizó un segundo ensayo de vibración libre sin el LVDT, para evitar el amortiguamiento que éste producía a la estructura. Se tomaron registros de aceleraciones mediante un acelerómetro y un registro de desplazamientos por medio del Sensor Láser, se obtuvo la frecuencia natural de la estructura (ω) y la razón de amortiguamiento de esta (ζ) para así realizar comparaciones entre los resultados obtenidos de los registros de aceleraciones y desplazamientos.

2.3.3 Ensayo de movimiento sinusoidal

La mesa vibratoria fue instrumentada con un LVDT y con el Sensor Láser. Posteriormente fue programada para realizar un movimiento sinusoidal con frecuencia de 1hz, obteniendo dos registros de desplazamientos, uno mediante LVDT y otro mediante Sensor Láser. El montaje se pude observar en la figura 8.

Figura 8. Ensayo con LVDT y Sensor Láser

2.3.4 Ensayo de movimiento con barrido frecuencial de 1Hz a 10Hz

A la mesa vibratoria uniaxial se le programó un movimiento con un barrido frecuencial logarítmico iniciando a 1Hz y finalizando a 10Hz. Este ensayo fue instrumentado mediante un LVDT y un Sensor Láser, realizando una comparación en el contenido espacial para verificar desplazamientos en el tiempo y una comparación en el contenido frecuencial para identificar el barrido programado en la mesa y evaluar la función de transferencia entre la señal del LVDT y el Sensor Láser con el fin de valorar la correspondencia en el contenido frecuencial de las dos señales.

3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

En cada ensayo se tiene una señal de referencia para compararla en contenidos temporal y frecuencial, con los resultados obtenidos por medio del Sensor Láser. Esto se hace con el fin de obtener discrepancias de amplitudes y frecuencias del movimiento, además de reconocer parámetros dinámicos propios de la estructura.

Las señales de aceleraciones fueron usadas como referencia para la identificación de frecuencias naturales, siendo este el único dato de comparación entre una señal de aceleraciones y una señal de desplazamientos debido a la dificultad de la doble integración de la señal de aceleraciones para obtener una señal de desplazamientos.

3.3.1 Ensayo de Vibración Libre: LVDT Vs Sensor Láser

En este ensayo se realizó una prueba de vibración libre, la cual consistió en aplicar un desplazamiento inicial para luego registrar el movimiento en vibración libre mediante LVDT y Sensor Láser, en la figura se observa una zona inicial que es la aplicación del desplazamiento y luego el movimiento en vibración libre (ver Figura 9).

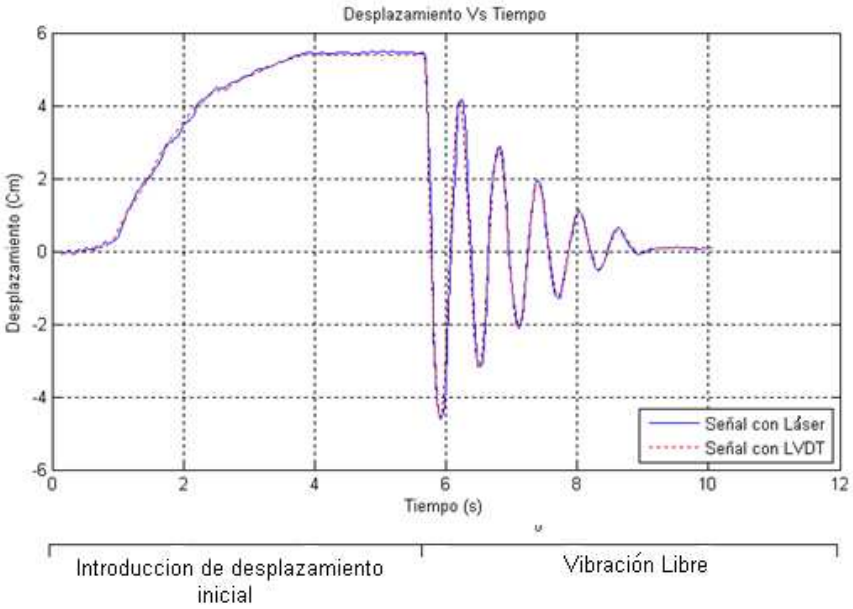

Figura 9. Vibración libre: LVDT Vs Sensor Láser

La frecuencia de este movimiento fue analizada en las dos señales mediante la transformada rápida de Fourier FFT, los resultados son los siguientes:

	Frecuencia (Hz)
Sensor Láser	0.59
LVDT	0.60
% de diferencia =	**0.27%**

Tabla 1. Comparación de frecuencias naturales: LVDT Vs Sensor Láser

Por medio del Decremento Logarítmico se obtuvo la razón de amortiguamiento de las dos señales. Los resultados son los siguientes:

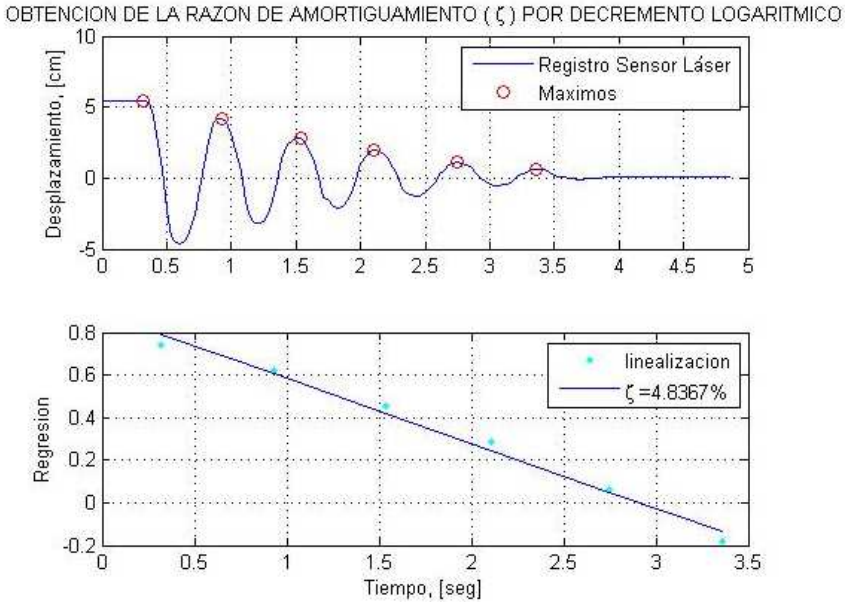

Figura 10. Obtención de la Razón de Amortiguamiento (ζ) para Sensor Láser

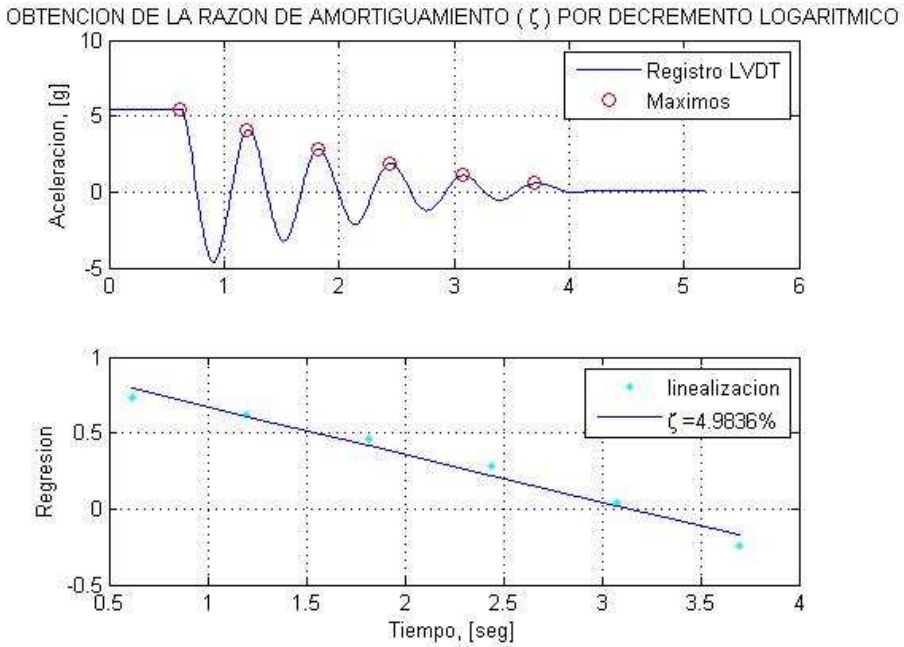

Figura 11. Obtención de la Razón de Amortiguamiento (ζ) para LVDT

	Razón de Amortiguamiento ζ (%)
Sensor Láser	4.84
LVDT	4.99
% de diferencia =	**2.94%**

Tabla 2. Comparación de Razón de Amortiguamiento (ζ): LVDT Vs Sensor Láser

Se puede observar un buen comportamiento de la señal del Sensor Láser respecto a la señal del LVDT, donde la razón de amortiguamiento tiene un margen de error mas elevado de lo esperado, debido a que el algoritmo para reconocer más eficazmente la razón de amortiguamiento requiere de una mayor cantidad de picos en la señal.

El LVDT en contacto con la estructura proporciona un aumento en el amortiguamiento estructural debido a que la frena por estar en contacto con ella, para solucionar esto se realizaron mediciones en la misma estructura mediante Sensor Láser y Acelerómetro

3.3.2 Ensayo de Vibración Libre: Acelerómetro Vs Sensor Láser

Debido a que una señal es de aceleraciones y la otra es de desplazamientos no se puede realizar una verificación en el contenido espacial para realizar una comparación de desempeño en desplazamiento (ver Figura 12), pero se puede analizar estas dos señales realizando comparaciones de frecuencia natural y razón de amortiguamiento de la estructura.

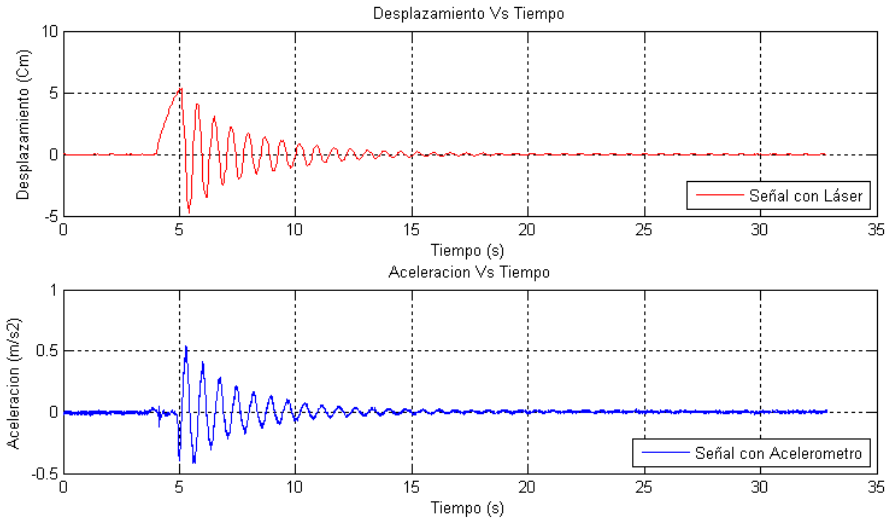

Figura 12. Vibración libre: Acelerómetro Vs Sensor Láser

Usando la Transformada Rápida de Fourier se identificó la frecuencia natural del pórtico en cada señal (ver tabla 3)

	Frecuencia natural (Hz)
Sensor Láser	0.72
Acelerómetro	0.73
% de diferencia =	**0.34%**

Tabla 3. Comparación de Frecuencias: Acelerómetro Vs Sensor Láser

Por medio del Decremento Logarítmico se obtuvo la razón de amortiguamiento de las dos señales, parámetro propio de la estructura e independiente del instrumento con que se esté realizando la medición (ver Figura 13 y 14).

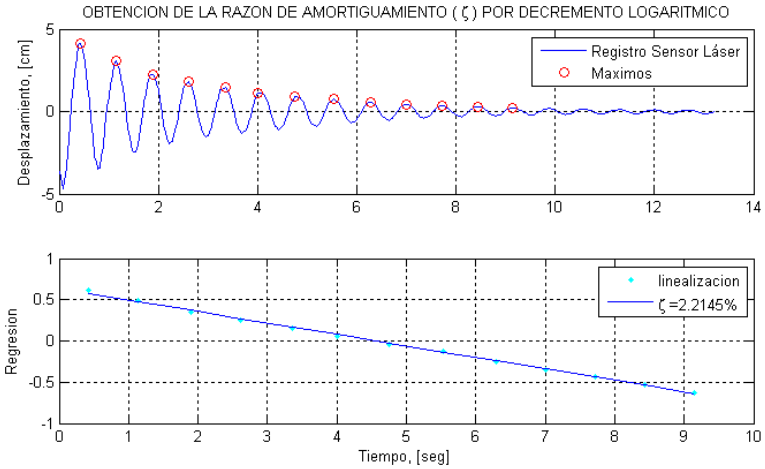

Figura 13. Obtención de la Razón de Amortiguamiento (ζ) para Sensor Láser

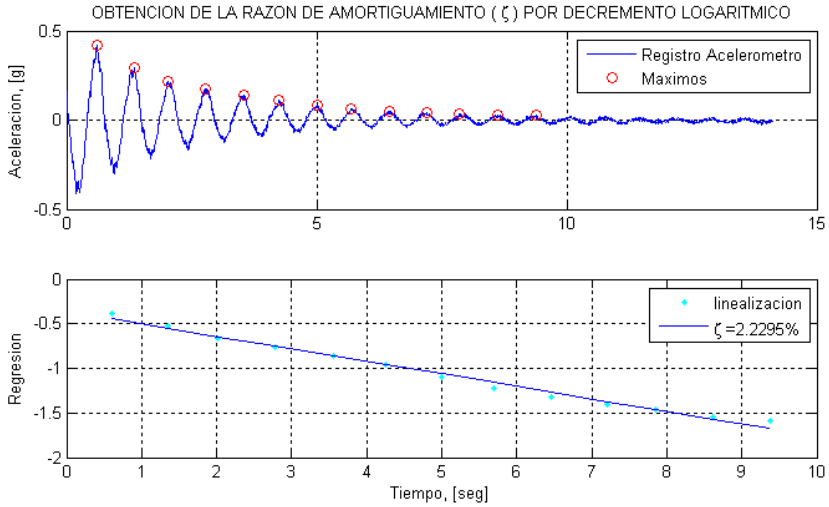

Figura 14. Obtención de la Razón de Amortiguamiento (ζ) para Acelerómetro

	Razón de Amortiguamiento, ζ (%)
Sensor Láser	2.21
Acelerómetro	2.23
% de diferencia =	**0.67%**

Tabla 4. Comparación de Razón de Amortiguamiento: Acelerómetro Vs Sensor Láser

3.3.3 Ensayo de movimiento sinusoidal: LVDT vs Sensor Láser

Para el ensayo de movimiento sinusoidal se compararon las señales obtenidas por un LVDT y el Sensor Láser, monitoreando el movimiento de la mesa, la cual fue programada para un movimiento con una frecuencia de 1hz. En la Figura 15, se muestran las señales obtenidas con LVDT y Láser observando un buen desempeño del Sensor láser con referencia a la señal del LVDT

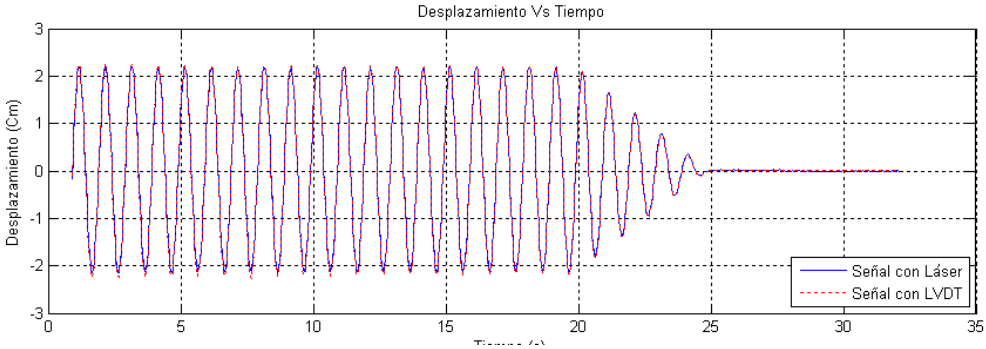

Figura 15. Movimiento Sinusoidal: LVDT Vs Sensor Láser

Las dos señales fueron analizadas usando la transformada rápida de Fourier identificando la frecuencia de este movimiento, los resultados son los siguientes:

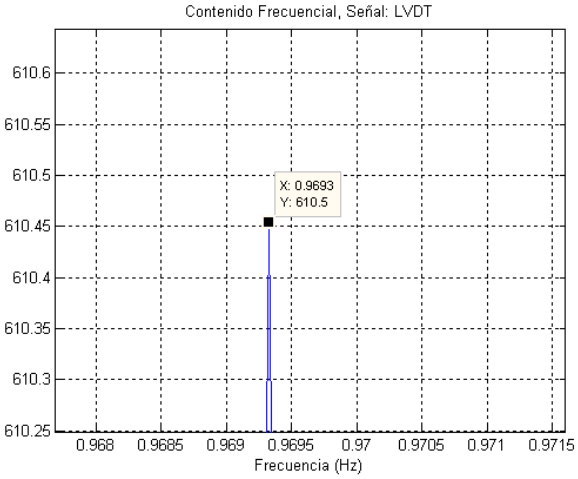

Figura 16. Contenido Frecuencial de la Señal del LVDT

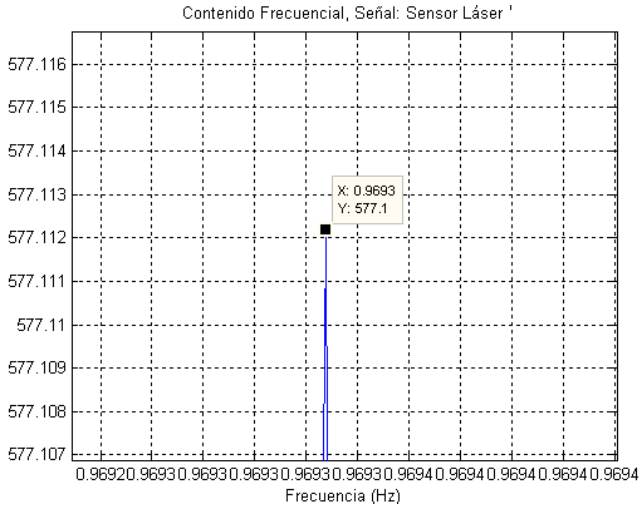

Figura 17. Contenido Frecuencial de la Señal del Sensor Láser

	Frecuencia (Hz)
Sensor Láser	0.97
LVDT	0.97
% de diferencia	**0%**

Tabla 5. Comparación de Frecuencias: LVDT Vs Sensor Láser

Para este movimiento no hubo porcentajes de error, comparando los resultados obtenidos con el Sensor Láser y con el LVDT.

En cuanto a desplazamientos se tiene una diferencia en los picos del movimiento, en donde se registró un mayor desplazamiento con el LVDT (ver Figura 18.). Para evaluar estas diferencias se tomó el mayor valor en desplazamiento de la señal del LVDT y se comparó con la señal del Sensor Láser.

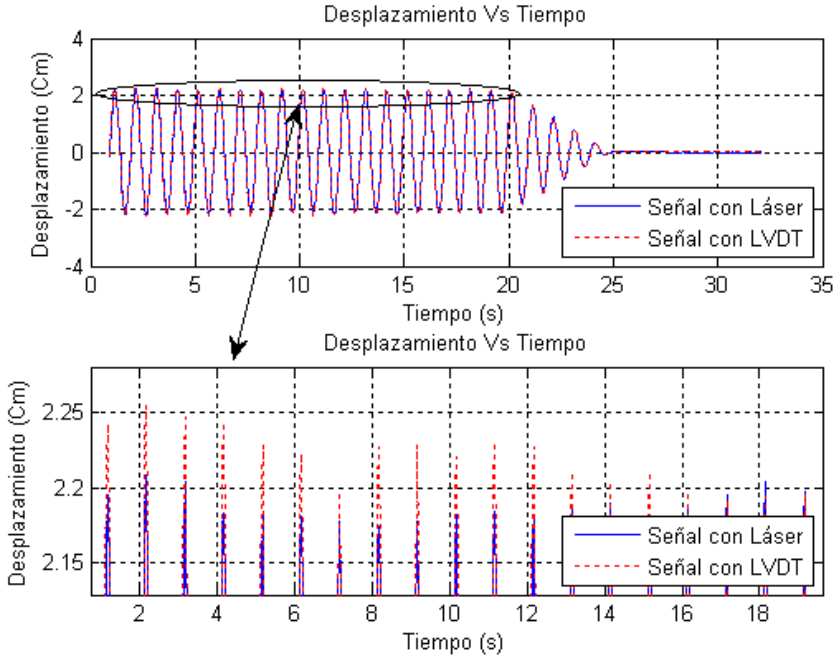

Figura 18. Comparación de máximos desplazamientos

	Máximo desplazamiento registrado (cm)
Sensor Láser	2.21
LVDT	2.26
% de diferencia	**2.08**

Tabla 6. Comparación de máximos desplazamientos: LVDT Vs Sensor láser

En la tabla 6 se observa una diferencia de 2.08%, porcentaje aceptable considerando la correspondencia en frecuencia de las dos señales.

3.3.4 Ensayo de movimiento con barrido frecuencial de 1Hz a 10Hz

En este ensayo se aplicó un barrido de frecuencias a la mesa vibratoria de 1Hz a 10 Hz, donde se observa una disminución en la amplitud del movimiento (ver Figura 19), debido a que la mesa no mantiene amplitud constante en movimiento para un barrido frecuencial.

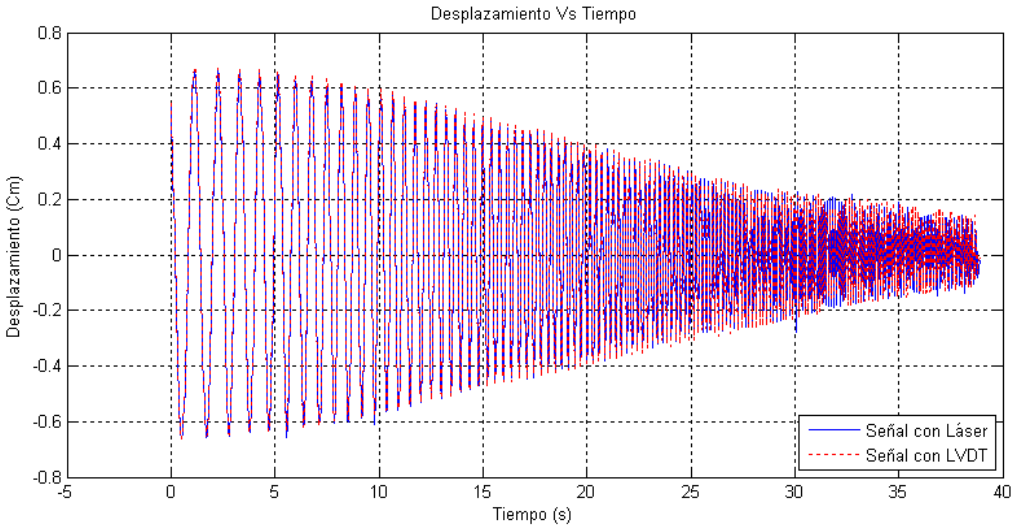

Figura 19. Comparación de desplazamientos: LVDT Vs Sensor láser

Para verificar la correspondencia de las señales se evaluó una función de transferencia entre la señal del LVDT y la señal del Sensor Láser observando que esta se hace uno, indicando que las señales son muy parecidas.

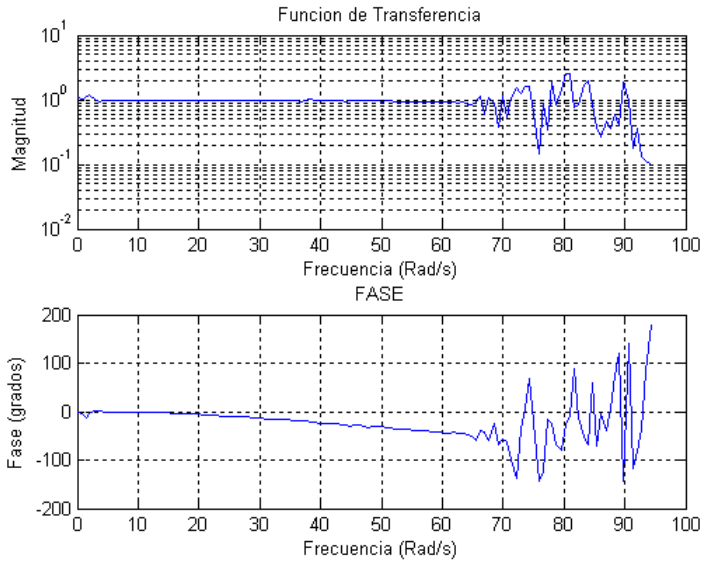

Figura 20. Función de transferencia y fase: LVDT Vs Sensor láser

La función de transferencia es valida desde 6.28rad/s a 62.83Rad/s; después de este valor no se tiene información y la función de transferencia da diferente de uno.

Y para comprobar la efectividad del Sensor Láser al identificar las frecuencias de este barrido, se realizó un espectrograma (ver Figura 21.) a la señal de desplazamientos suministrada por el Sensor Láser.

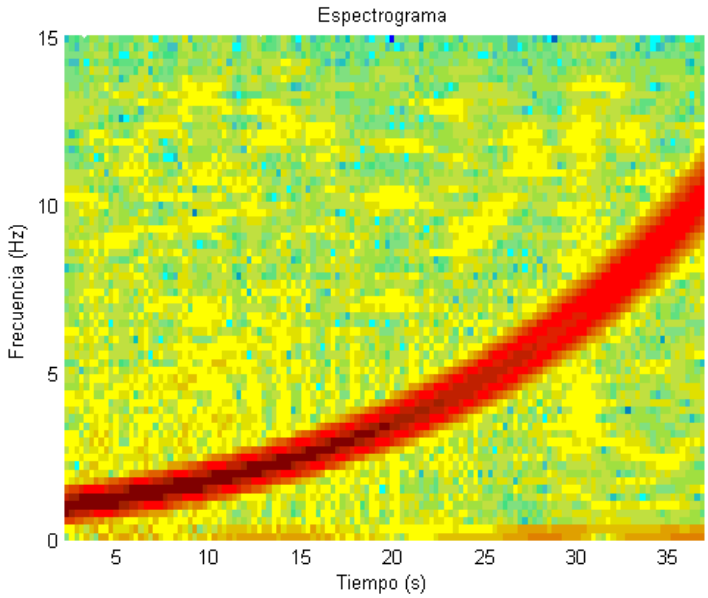

Figura 21. Espectrograma para la Señal del Sensor Láser.

En donde se observa el comportamiento logarítmico del barrido de frecuencias de 1Hz a 10Hz como se programó en la mesa vibratoria, obteniendo un resultado satisfactorio.

4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La medición de desplazamientos en estructuras mediante técnicas de visión artificial es viable. Una vez obtenidos los desplazamientos se identifican las propiedades dinámicas del movimiento como el periodo, la amplitud, la frecuencia y la razón de amortiguamiento en estructuras civiles, con un margen de confiabilidad aceptable.

Con los Sensores Láser se obtuvo resultados aceptables tanto en el contenido temporal como en el contenido frecuencial, con pequeñas diferencias respecto a los demás instrumentos comúnmente utilizados para monitoreo estructural.

La validación de esta metodología fue realizada utilizando equipos comunes, como una webcam a 30 FPS con resolución de 320x240 pixeles y un láser de luz roja ordinario, comprobando un buen desempeño. Se espera que con equipos mejores, como una cámara de alta velocidad con mejor resolución y un puntero láser con mayor capacidad de enfocar el haz de luz a largas distancias, estas pequeñas discrepancias desaparezcan y así obtener un sistema para medir desplazamientos bastante robusto y completamente efectivo.

Actualmente la instrumentación para monitoreo estructural requiere de grandes longitudes de cableado, esta metodología prácticamente no requiere de este, ya que los láser sólo requieren una pequeña batería y la adquisición del movimiento del láser se puede realizar sólo con el cable de conexión de la cámara al computador.

REFERENCIAS:

- 1. Biosignal and Biomedical Image Processing MATLAB based Applications - John L. Semmlow.
- 2. Digital Image Processing Using Matlab - Gonzalez Woods & Eddins
- 3. Atomic and Laser Physics Part II: Laser Physics - A.M. Fox (2001)
- 4. Displacement Measurements in Civil Structures Using Digital Cameras and Lásers, Juan M. Caicedo 2005,
- 6 Çelebi, M., Sanli, A (2002)., "GPS in Pioneering Dynamic Monitoring of Long-Period Structures", Earthquake.
- 7. Black, J. T., Pappa, R. S. (2003), "Videogrammetry Using Projected Circular Targets: Proof-of-Concept Test".
- 8. Helm, J. D., McNeill, S. R., Sutton, M. A., (1996) "Improved three-dimensional image correlation for surface
- 9. Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises, A. Nickitopoulou, K. Protopsalti, S. Stiros. (2006).
- 10. A vision-based system for remote sensing of bridge displacement, Jong Jae Lee, Masanobu Shinozuka. (2005).
- 11. A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems, AMazen Wahbeh, John P Caffrey and Sami F Masri (2003).
- 12. Computational Colour Science Using MATLAB - Stephen Westland & Caterina Ripamonti.
- 13. Embedded Image Processing with DSP Examples in MATLAB - Shehrzad Qureshi.