**Coloquio de Estructura.**

**Título**

**“Identificación de sistemas estructurales a partir de pruebas modales”**

***Title***

***Identification of Structural systems based on modal tests.***

**Nombre y Apellidos**

1-Abdel José Solano Guerra. Empresa de Construcción y Montaje de Sancti Spíritus. Cuba. abdelsg1992@nauta.cu.

**Resumen:**

Se presentan métodos para identificar los sistemas dinámicos estructurales lineales, a través de su espectro de frecuencias y períodos de los modos componentes, amortiguamientos y formas principales de oscilaciones, basado en el procesamiento digital de señales provenientes de ensayos modales en los que se mide la respuesta en el tiempo del sistema, por lo que se utiliza el Análisis Modal Operacional (OMA), con diversas fuentes de excitación.

Así mismo, se define en detalle, la forma de emplear algún software existente para dicho procesamiento (MatLab).

Al final, se presenta la aplicación de estas herramientas en un caso de estudio de un puente, en este caso el puente de Boca de Jaruco, ubicado en el km 40 de la vía Blanca en Mayabeque; donde las mediciones efectuadas se han realizado con el georadar IBIS de la ENIA Nacional, como señales digitales tiempo-historia de velocidad de oscilación vs tiempo. Las mismas se procesan con herramientas diferentes (Toolbox de MatLab y el propio software incorporado al georadar IBIS) y se comparan los resultados obtenidos de dicho procesamiento.

Se arriban a conclusiones y recomendaciones acerca de los métodos empleados y las vías para la obtención de los resultados que se presentan.

**Problemática:** La necesidad de profundizar en el estudio y sintetizar la esencia de los métodos del procesamiento digital de las señales obtenidas al efectuar ensayos modales en puentes y otras estructuras, con los cuales pueden identificarse los sistemas estructurales, ya bien sea la identificación de las características estructurales dinámicas del comportamiento de las mismas (frecuencias, formas principales de oscilaciones y amortiguamientos) o de las fuerzas que actúan sobre ellos, con la importancia que de esta determinación se deriva para el país en general.

**Objetivo(s):** Reconocer los métodos para el procesamiento digital de señales de pruebas dinámicas en puentes, que posibilitan identificar los sistemas dinámicos estructurales mediante análisis modal operacional y aplicarlos a un caso de estudio de un puente. **Metodología:** la metodología que se presenta con vistas a identificar los principales parámetros que definen el comportamiento dinámico de la estructura partiendo de los resultados de pruebas modales, tiene además como valor agregado el metodológico, al quedar establecido e implementada la metodología a seguir incluyendo la manera de conducirse utilizando los principales softwares usados para tales fines.

**Resultados y discusión:**

La configuración de parámetros utilizada mediante el método de Welch favorece la exactitud en la estimación de los valores calculados a partir de la representación espectral de las señales de velocidad.

El empleo de la representación de las señales en el dominio de la frecuencia ofrece información adicional acerca de la calidad de las señales registradas, permitiendo detectar la presencia de señales ajenas al proceso que se desea analizar.

La utilización del filtrado en el preprocesamiento de las señales, como paso previo a su representación en el dominio de la frecuencia, apoya también la obtención de resultados más precisos.

El método de “Recolección de Picos” o “semi-ancho de banda” es aplicable con mejores resultados a estos casos de oscilaciones forzadas, que el del decremento logarítmico, ya que en una medición en tráfico abierto resulta muy difícil de determinar cuál es la fase decreciente de las oscilaciones de manera exacta.

Para el procesamiento de los modos se debe contar con más puntos de señales y con repetición de ellos al cambiarlos de posición al menos en varios puntos, cosa que no se hizo en el informe de la ENIA todos fueron puntos fijos.

**Conclusiones:**

Los métodos de análisis modal para la identificación de sistemas estructurales consisten en determinar los parámetros modales de los mismos; esto es, las frecuencias naturales, las razones de amortiguamiento y los modos de dichos sistemas estructurales.

De acuerdo a la implementación experimental para poder obtener los datos necesarios para el análisis modal de sistemas estructurales, los métodos pueden clasificarse en Análisis modal experimental (generalmente restringido a condiciones controladas de laboratorio, donde se puede medir la excitación con exactitud) y Análisis Modal Operacional en el cual la excitación puede ser ambiental, como el caso de estudio presentado.

Los métodos para el análisis modal también se clasifican de acuerdo con el dominio en el cual se realiza el análisis; esto es, en el dominio de la frecuencia, en el dominio del tiempo y un conjunto de métodos que han sido desarrollados más recientemente que se identifican por realizar el análisis con múltiples entradas y múltiples salidas. También se muestra una clasificación de los mismos de acuerdo con los grados de libertad que se consideren.

Para los métodos de análisis modal para la identificación se sistemas estructurales en el dominio de la frecuencia es de vital importancia la o las funciones de respuesta de frecuencia (FRF) y la calidad del proceso mediante el cual se obtienen sus datos

El Matlab dispone de un número de herramientas muy útiles para resolver los complejos problema que involucran el procesamiento de las señales obtenidas ya sea del análisis modal experimental o del análisis modal operacional.

Para mediciones de señales de tráfico abierto resulta complicado determinar varios de los parámetros modales de manera exacta, por lo tanto, con el trabajo realizado el método de recolección de picos es aplicable a este tipo de caso con oscilaciones forzadas debido a los valores obtenidos en el cálculo de amortiguamiento al corresponder con los valores para una estructura de hormigón armado.

**Abstract:**

Methods are presented to identify linear structural dynamic systems, through their spectrum and periods components modes, damping and main forms of oscillations based on the digital processing of signals from modal assays in which the response in time of the system is measured, so the Operational Modal Analysis (OMA) is used, with different excitation sources. Likewise, it defined in detail, how to use some existing software for that processing (MatLab), which corresponds to the recognized methods in Chapter 2. At the end, the application of these tools in a case study of a bridge is presented, in this case the bridge of Boca de Jaruco, located at km 40 of the White pathway in Mayabeque; where measurements have been made with the IBIS Georadar of ENIA, as digital time-history signals of swing speed vs. time. Those signals are processed with different tools (Toolbox of MatLab, and the software incorporated by IBIS GPR) and the results of such processing are compared. Conclusions and recommendations on the methods and ways to obtain the results are presented.

**1. Introducción**

En las últimas dos décadas, el análisis modal se ha convertido en una herramienta importante para determinar, mejorar y optimizar las características dinámicas de las estructuras. El análisis modal clásico está basado en la solución de ecuaciones diferenciales o algebraicas que describen diferentes estructuras dinámicas continuas en la que la elegancia de la solución es evidente.

El análisis modal es una herramienta físico-matemática teórica, que permite a través de la solución de ecuaciones diferenciales o algebraicas que se modelan en una estructura dada, calcular parámetros del comportamiento dinámico de las mismas ante determinadas formas de excitaciones o perturbaciones aplicadas en determinadas posiciones, pero como modelo físico matemático, siempre tendrá limitaciones o consideraciones, para poder obtener una solución de dichos sistemas de ecuaciones diferenciales. Dadas estas limitaciones y la aparición de equipamiento experimental de alta tecnología, el cual permite obtener señales reales, resultado de experimentación en estructuras prácticas, esto complementa o acerca más a la realidad las posibilidades que el análisis modal teórico tiene.

El análisis modal experimental se ha convertido en un pilar en la dinámica estructural donde; a la detección del daño estructural invisible, siempre se le ha dado la debida prioridad en la práctica ingenieril. Recientemente la detección del mismo se ha aplicado con mayor auge en las estructuras de puentes (Cruz, 2012). Para ello se han utilizado las pruebas modales como una eficaz técnica de ensayos no destructivos para localizar rápidamente la presencia de defectos críticos. Esto puede proporcionar información muy valiosa acerca del estado de los puentes, la magnitud de su deterioro, lo cual resulta información vital para el mantenimiento de los puentes y una evaluación más certera del presupuesto para su fabricación.(He & Fu, 2001).

El equipamiento requerido para las pruebas modales ha ido evolucionando a la par de los métodos y herramientas para interpretar y procesar sus resultados, de manera que hoy se cuenta con equipos potentes como el Georadar (IDS-Ingenieria del Sistemi, 2013), que no requiere de ningún tipo de sensores conectados y que por el principio de interferencia puede determinar, comparando las características de una onda emitida con una frecuencia de muestreo muy alta, con las de la onda reflejada en el objeto a medir, el diagrama tiempo historia de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de la estructura en estudio(Claro Duménigo, 2015).

La experimentación de estructuras cuando se realizan pruebas de carga dinámicas, resulta el paso esencial para producir una señal, que al ser analizada por distintos procedimientos, puede brindarnos la información acerca de los parámetros del comportamiento dinámico de la estructura deseados, como son: la composición del espectro de frecuencias y períodos de oscilaciones libres del sistema, destacándose en dicho espectro, el período fundamental, las formas principales de oscilaciones correspondientes a los modos caracterizados por los períodos y frecuencias, y el amortiguamiento correspondiente a cada uno de dichos modos de oscilación libre identificados (Claro Duménigo, 2015).

El desarrollo del análisis modal como una nueva tecnología es propulsado por su capacidad de ofrecer soluciones rápidas y eficaces a los problemas de ingeniería de la vida real utilizando los métodos y herramientas para interpretar dichos resultados, ambos tienen su basamento en la teoría del procesamiento de señales (Hwei P. , 1995), la transformada de Laplace (Pargada, s.f.) y Fourier (P.Witomski, 1999), la matemática de números y variables complejos (González Morales, 2010), la convolución de funciones y otros métodos matemáticos que suelen utilizarse para determinar la composición de frecuencias del espectro del movimiento de la estructura y las ordenadas modales de cada uno de los modos de oscilaciones propias que componen el movimiento de oscilaciones libres de la misma.

Una vez realizado dicho análisis espectral y de composición modal, pueden usarse otras herramientas y métodos para procesar la información obtenida sobre el comportamiento real de la estructura y proporcionar información sobre cuál debe ser la rigidez (EI) de la estructura que brinde dicho comportamiento, entre otros parámetros estructurales, como las fuerzas que provocan la excitación, etc., en lo que se conoce como Identificación de Fuerzas (Maes, 2014) o Identificación de parámetros estructurales (Reynders & De Roeck, 2014) .

El empleo del software MACEC v. 3.0 (Reynders, et al., 2011) donado por los profesores de la división de Mecánica Estructural del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Leuven, posibilita, partiendo de una señal competente y obtenida de la colocación en múltiples posiciones, de los sensores en una estructura de un puente, realizar el análisis espectral modal de la señal y obtener la composición de frecuencias, períodos, y las formas principales de oscilaciones de los modos identificados.

En nuestro país, con la adquisición del Georadar IBIS (IDS-Ingenieria del Sistemi, 2013) por parte de la ENIA Nacional, se facilita el soporte material y logístico para la realización de ensayos modales de estructuras.

El presente trabajo está enfocado hacia la recopilación de los métodos para el procesamiento digital de señales de pruebas dinámicas en puentes, que posibilitaran identificar los sistemas dinámicos estructurales mediante análisis modal operacional aplicando de manera consiente el software MatLab para ello.

**Problema Científico:**

La necesidad de profundizar en el estudio y sintetizar la esencia de los métodos del procesamiento digital de las señales obtenidas al efectuar ensayos modales en puentes y otras estructuras, con los cuales pueden identificarse los sistemas estructurales, ya bien sea la identificación de las características estructurales dinámicas del comportamiento de las mismas (frecuencias, formas principales de oscilaciones y amortiguamientos) o de las fuerzas que actúan sobre ellos, con la importancia que de esta determinación se deriva para el país en general.

**Objetivos específicos:**

Establecer el estado actual del conocimiento sobre los métodos existentes para el procesamiento digital de señales de ensayos modales en estructuras, que permiten la identificación de los sistemas dinámicos estructurales.

Reconocer los métodos para el procesamiento digital de señales de ensayos modales, que posibilitan identificar los sistemas dinámicos estructurales, usando fundamentalmente el Análisis Modal Operacional para ello.

Definir la forma de emplear el software disponible MATLAB para el procesamiento digital de señales a partir de los métodos esbozados antes, en la identificación de sistemas estructurales y aplicarlos a un caso de estudio.

En consecuencia, se pueden formular las siguientes interrogantes científicas:

1. ¿Cuál es el estado actual de los conocimientos sobre los métodos para el procesamiento y la interpretación de las señales obtenidas de ensayos modales de estructuras en general y de puentes en particular?,

2. ¿Sería posible aprovechar las herramientas de procesamiento digital que ofrece el MatLab para validar y complementar los resultados obtenidos del empleo del software con las mediciones disponibles del Georadar IBIS (IDS- ¿Ingeniería del Sistema, 2013) de la ENIA nacional en puentes del país?

3. ¿Qué aspectos conclusivos pueden establecerse luego de aplicar esas herramientas a un caso de estudio y compararlos con los obtenidos del software MatLab?

Por lo que pudiera establecerse que el aspecto esencial que justifica la realización de esta investigación es que con el desarrollo del presente trabajo se realiza una contribución al conocimiento de los métodos de la Dinámica Estructural, la Matemática, y el empleo de la Computación y en específico el procesamiento digital de señales, que posibilita a los especialistas en monitoreo de estructuras a través de ensayos modales, la identificación de sistemas estructurales necesarios para otras aplicaciones, entre las que se encuentran: la calibración de modelos estructurales del comportamiento dinámico de estructuras, la identificación de fuerzas y la evaluación del daño en estructuras y su localización dentro de los puentes, entre otras.

**2. Metodología**

Los métodos de investigación fundamentales que se emplearán serán:

Métodos del nivel teórico:

Método histórico lógico, para el establecimiento del estado actual del conocimiento sobre los métodos para realizar la modelación de estructuras de puentes desde el punto de vista dinámico y los métodos para el procesamiento digital de las señales obtenidas de pruebas de cargas dinámicas en puentes, con vistas a la identificación de algunos de los parámetros del comportamiento dinámico de la estructura como son las frecuencias de oscilación natural, los modos o formas principales de oscilaciones propias, entre otros, mediante el cual se realizará un análisis histórico de la temática y se determinará cuáles han sido las tendencias; se definirán los conceptos claves sobre estas temáticas así como se elaborará una síntesis de las principales concepciones al respecto, identificando los aspectos positivos y realizando análisis críticos de las deficiencias.

Métodos del nivel empírico

Se utiliza como diseño el estudio de casos en puentes, donde se realizará un monitoreo mediante ensayos modales y estáticos, así como un levantamiento de todas las características del mismo, aplicándose el método de observación participante y la técnica de notas de campo.

Métodos del nivel matemático estadístico

El análisis numérico (transformada rápida de Fourier, Transformada Z, wavelet, etc.) de las señales obtenidas de experimentación modal de estructuras reales de puentes, se utilizará para identificar los parámetros dinámicos del sistema estructural.  Del análisis comparativo de la respuesta modelada y medida de la estructura de los puentes estudiados, se pueden inferir conclusiones sobre el comportamiento dinámico real y modelado de dichas estructuras, su nivel de daño estructural, la localización de los mismos, etc.

**3. Resultados y discusión**

Se muestra la aplicación de herramientas del MatLab para el procesamiento digital de señales utilizando el análisis modal operacional a puentes mediante el método de “Recolección de Picos”, aplicado a un caso de estudio. El caso de estudio es el “Puente Boca de Jaruco”, km 40 de la Vía Blanca. Se demuestra la validez de las herramientas aplicadas mediante la comparación con los resultados obtenidos por la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas al realizar una evaluación dinámica.

El puente de Boca de Jaruco se ubica en el km 40 de la Vía Blanca sobre el río Jaruco. Su construcción data de finales de la década de 1950. Esta vía sufre en los últimos años de un tráfico pesado intenso debido a la circulación de vehículos relacionados con la industria del petróleo. En el año 2015 se detecta que en el tablero y los pretiles en la zona correspondiente al tramo Gerber del puente se desarrollaron deformaciones que alcanzan los 8 cm. Esto coincide justamente en el apoyo de la viga isostáticas sobre la viga cabezal que une los voladizos de las vigas continuas (Díaz et al. 2016).

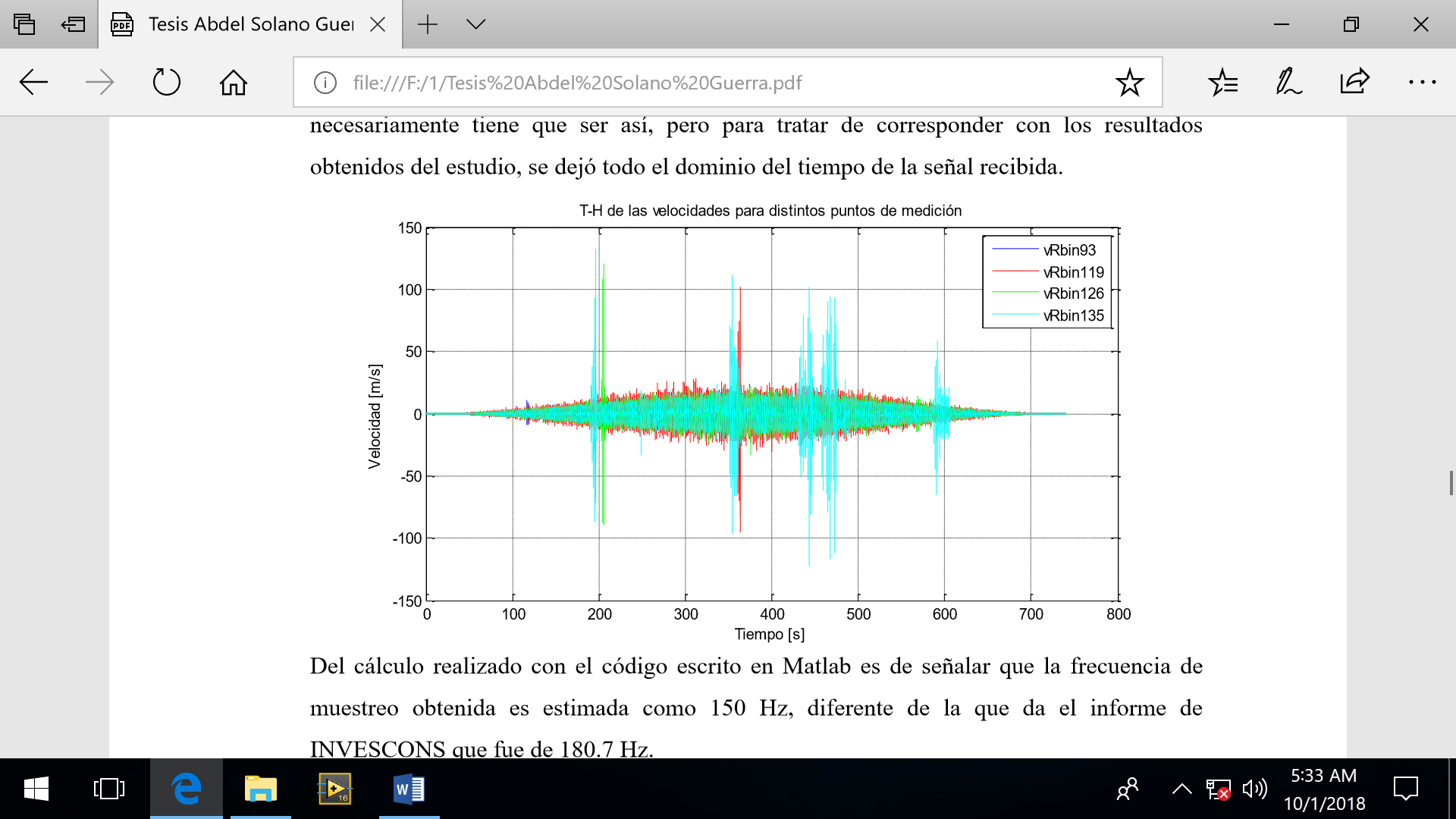
En el año 2014 fue necesario reparar una parte del tablero que colapsó. Por tal razón, las autoridades del Centro Provincial de Vialidad del Ministerio del Transporte solicitaron a la Oficina de Consultoría y Diseño de la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, INVESCONS, del MICONS la realización del diagnóstico y evaluación del comportamiento estructural del tramo Gerber del puente Boca de Jaruco y establecer las estrategias para su rehabilitación. Como resultados de la investigación se determinó que el puente presentaba un incorrecto comportamiento estructural donde, en función del decremento de la resistencia estructural de los elementos detectada, se decidió la aplicación de una nueva campaña de mediciones dinámicas con el objetivo de cuantificar y valorar las condiciones del inmueble (Diaz et al. 2016).

La evaluación del comportamiento de la estructura se aborda a partir del empleo de herramientas de simulación matemática basadas en el método de elementos finitos. Estas herramientas se nutren de la información obtenida en los trabajos de campo, por lo que el enfoque de la investigación se encamina a garantizar los elementos fundamentales de la modelación: geometría, cargas actuantes, materiales y condiciones de apoyo.

En la realización de las pruebas de cargas dinámicas al caso de estudio las señales se obtuvieron con el Radar Interferométrico IBIS-FS (Fig.3.2) que es un equipo que permite el monitoreo dinámico y estático de estructuras, las señales obtenidas son de tiempo-historia en velocidad donde la acción de la carga fue de tráfico abierto en 17 puntos ubicados alrededor del tramo Gerber.

Para el procesamiento de señales de ensayos modales a señales tomadas en el puente de Jaruco, mayo 2016. Las señales fueron facilitadas por los compañeros de INVESCONS, son señales tiempo historia de velocidad en cada uno de los puntos donde se fijaron los reflectores. El mismo contiene 110807 mediciones en cada variable.

Primeramente, deben seleccionarse los intervalos de tiempo de interés para el estudio de las señales, a partir de la determinación de la existencia de valores útiles en la señal a procesar. Sin embargo, en el procesador interno se trabajó todo el intervalo abierto de la señal, porque correspondía a una señal de tráfico abierto, y se procesó toda la señal. Esto no necesariamente tiene que ser así, pero para tratar de corresponder con los resultados obtenidos del estudio, se dejó todo el dominio del tiempo de la señal recibida.



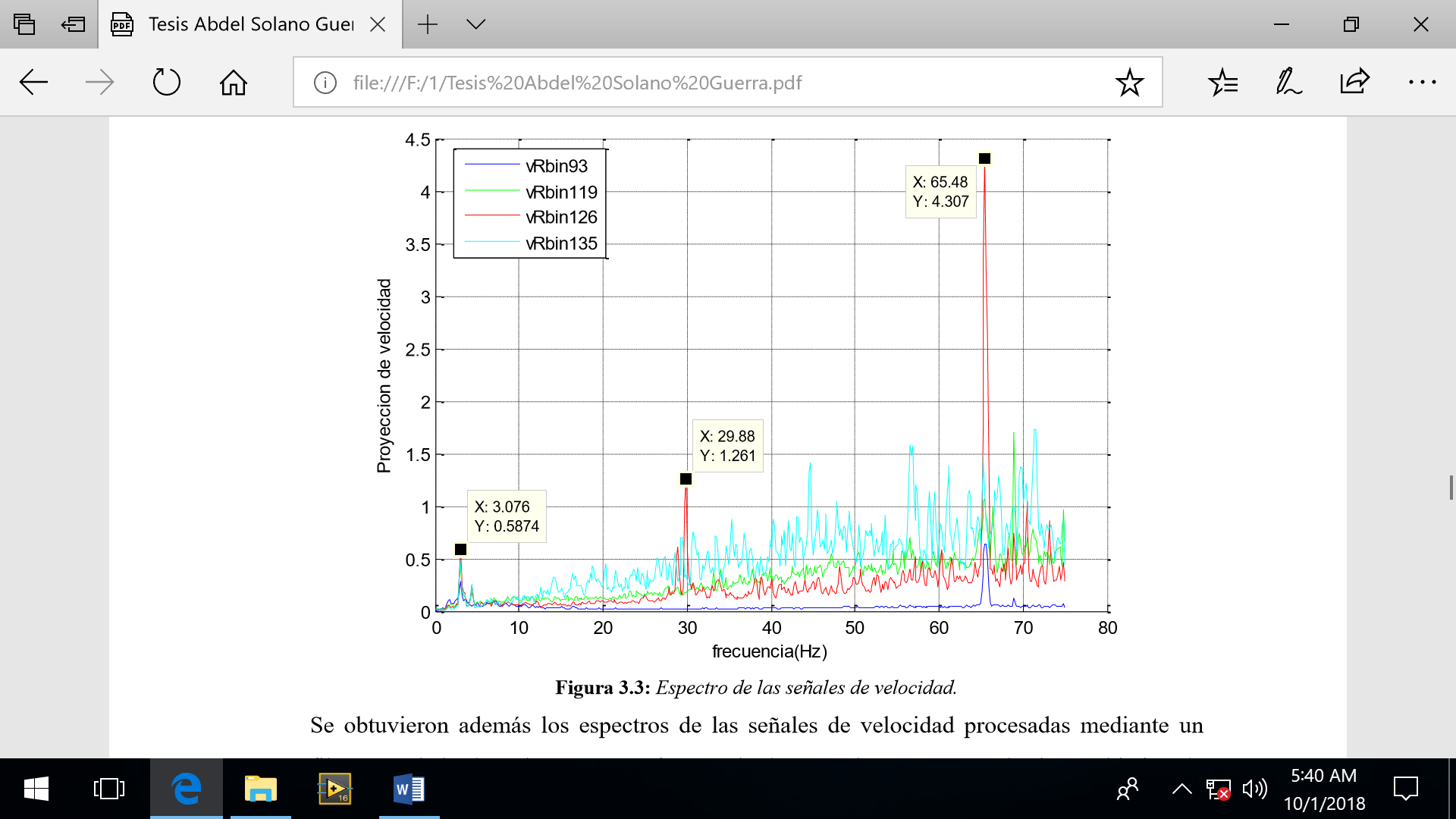
Del cálculo realizado con el código escrito en Matlab es de señalar que la frecuencia de muestreo obtenida es estimada como 150 Hz, diferente de la que da el informe de INVESCONS que fue de 180.7 Hz. Una vez leídos los datos de velocidad se puede estimar los datos de desplazamiento y de aceleración en cada reflector a partir de las relaciones clásicas entre los mismos, esto es, desplazamiento es la integral de la velocidad en el tiempo y aceleración es la derivada de la velocidad en el tiempo, aunque un contacto posterior con los autores del mencionado informe permitió conocer que ellos tienen esas señales. Para la caracterización de las señales de velocidad en el dominio de la frecuencia se utilizó el promediado espectral. Se empleó el método de estimación de Welch, con una configuración de parámetros indicada en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Configuración de parámetros para estimación de Welch.

|  |  |
| --- | --- |
| Parámetro | Valor |
| Cantidad de muestras por segmento | 2048 |
| Porcentaje de solapamiento entre segmentos contiguos | 80 |
| Función de ventana | Haming |

Elaboración propia.

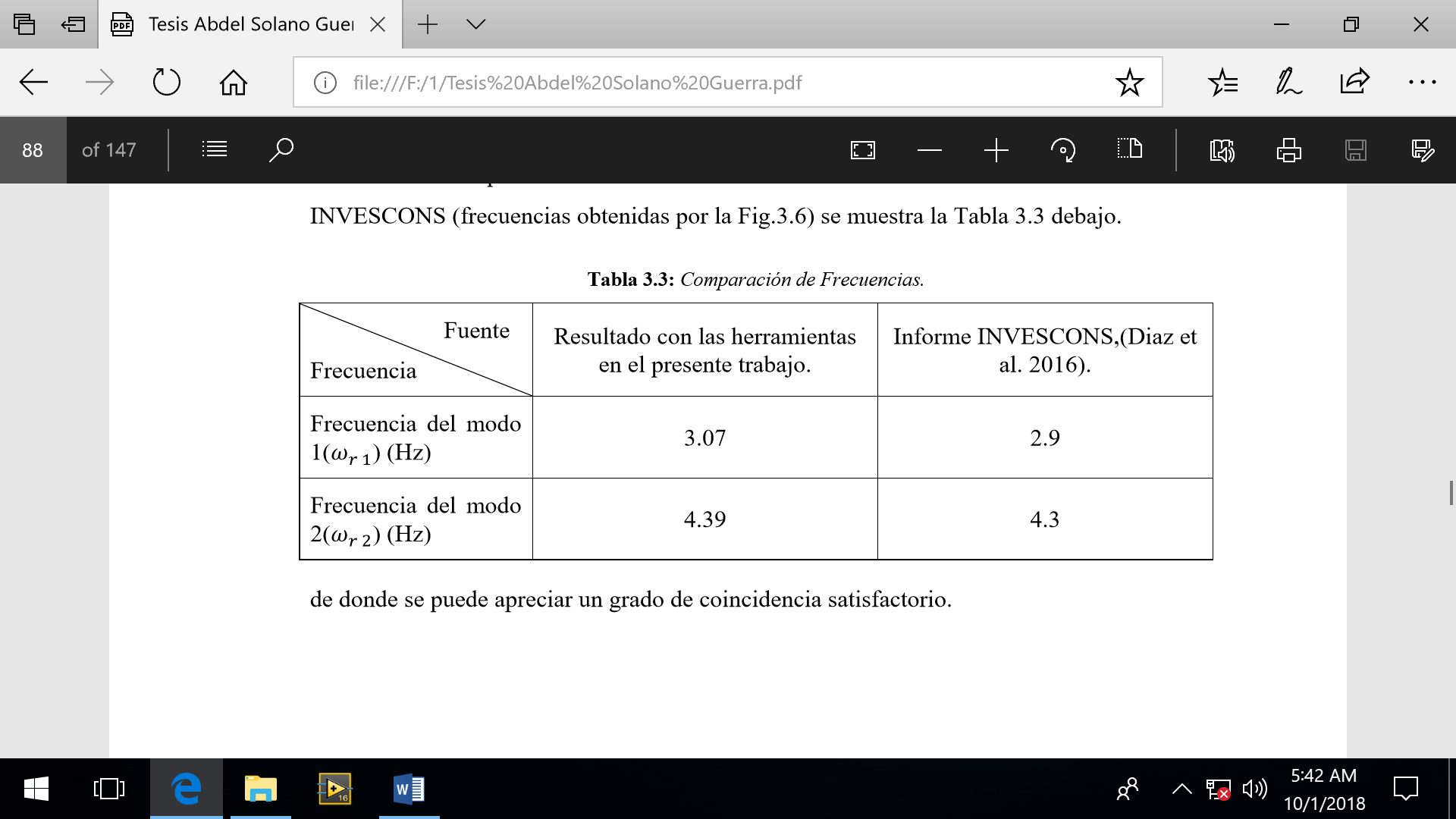
El resultado del espectro de las señales de velocidad en los puntos (reflectores de interés) se muestra en la Fig.3.3 debajo. Dicho comportamiento evidencia la presencia de componentes de frecuencias relativamente altas, que se obtienen del procesamiento de la señal.



Se obtuvieron además los espectros de las señales de velocidad procesadas mediante un filtro paso bajo de orden 30 y una frecuencia de corte de 10 Hz, con el mismo objetivo de comparar el resultado obtenido con las herramientas del MatLab empleadas en el presente trabajo y las del informe ya mencionado.

El método aplicado para la identificación de la frecuencia natural es el “Método de Recolección de Picos” explicado en el capítulo 2 epígrafe 2.2 el cual describe que la frecuencia natural del sistema se identifica a partir del valor del pico 𝜔𝑟 = 𝜔𝑝𝑖𝑐𝑜. Por lo tanto, como se muestra en la Fig.3.5 debajo, 𝜔𝑟 1 = 𝜔𝑝𝑖𝑐𝑜 1 = 3.07 𝐻𝑧 y 𝜔𝑟 2 = 𝜔𝑝𝑖𝑐𝑜2=4.39 𝐻𝑧.

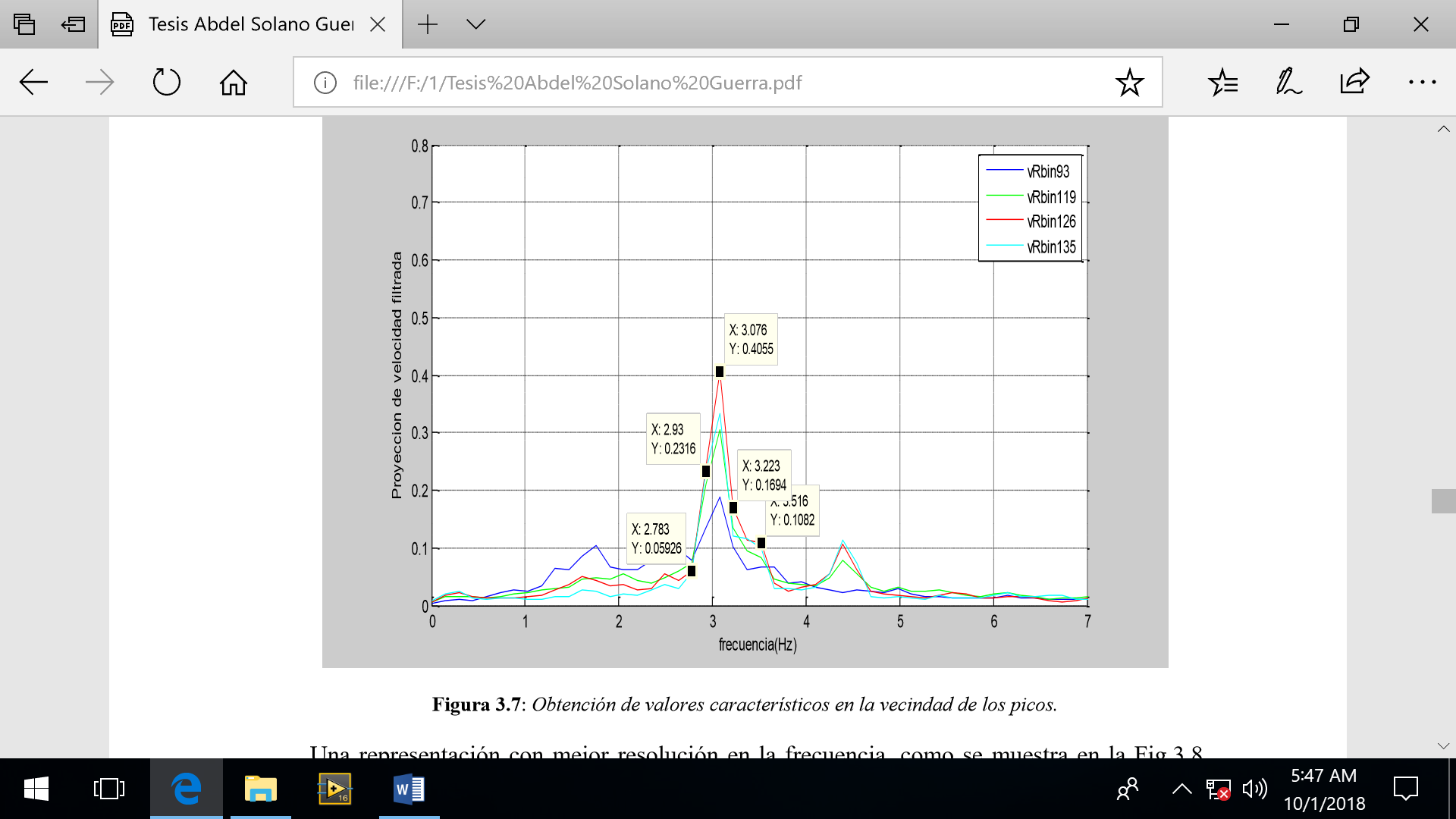
A modo de comparación con los resultados del análisis efectuado en el informe de INVESCONS (frecuencias obtenidas por la Fig.3.6) se muestra la Tabla 3.3 debajo.



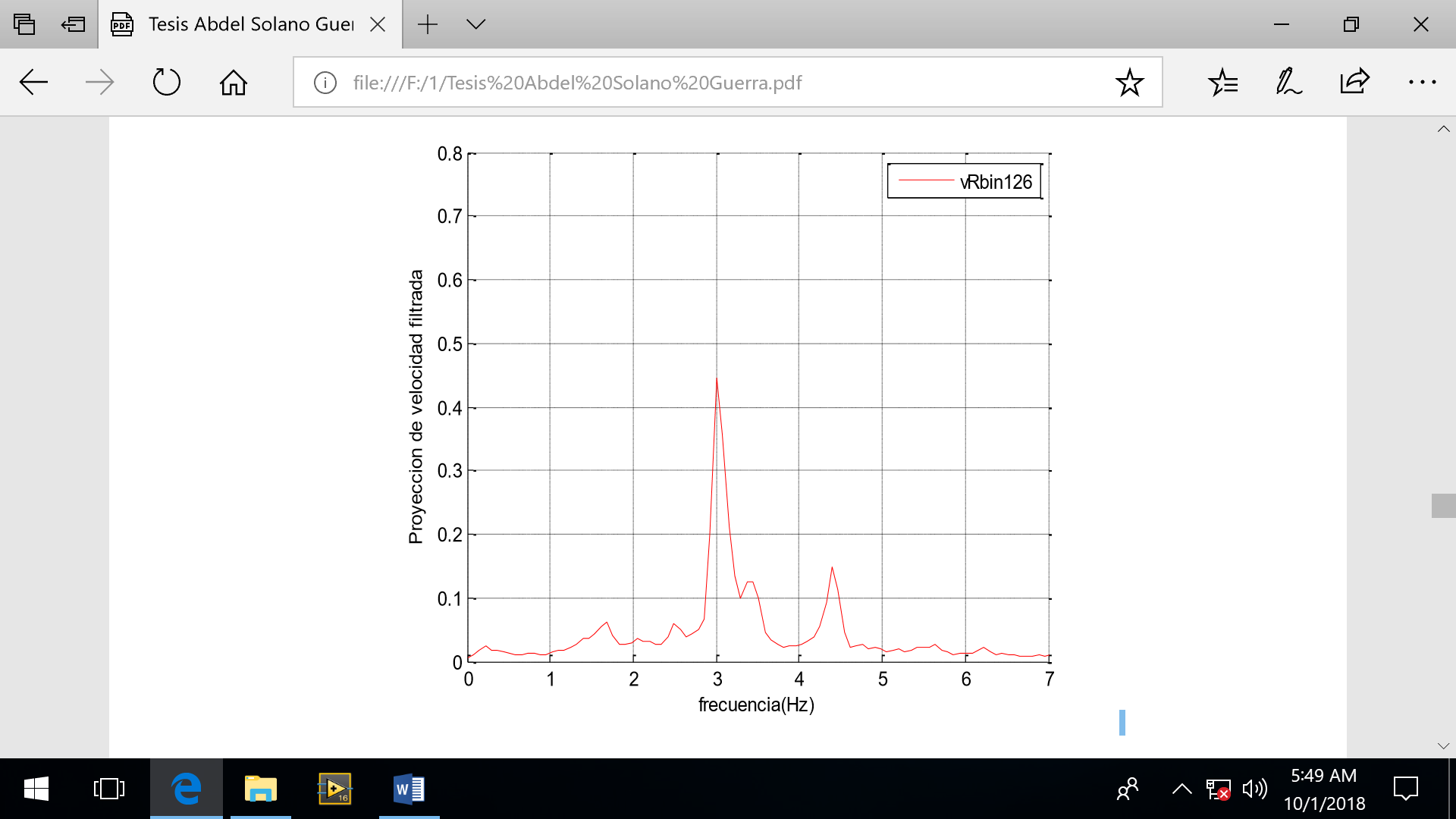
Elaboración propia.

de donde se puede apreciar un grado de coincidencia satisfactorio.

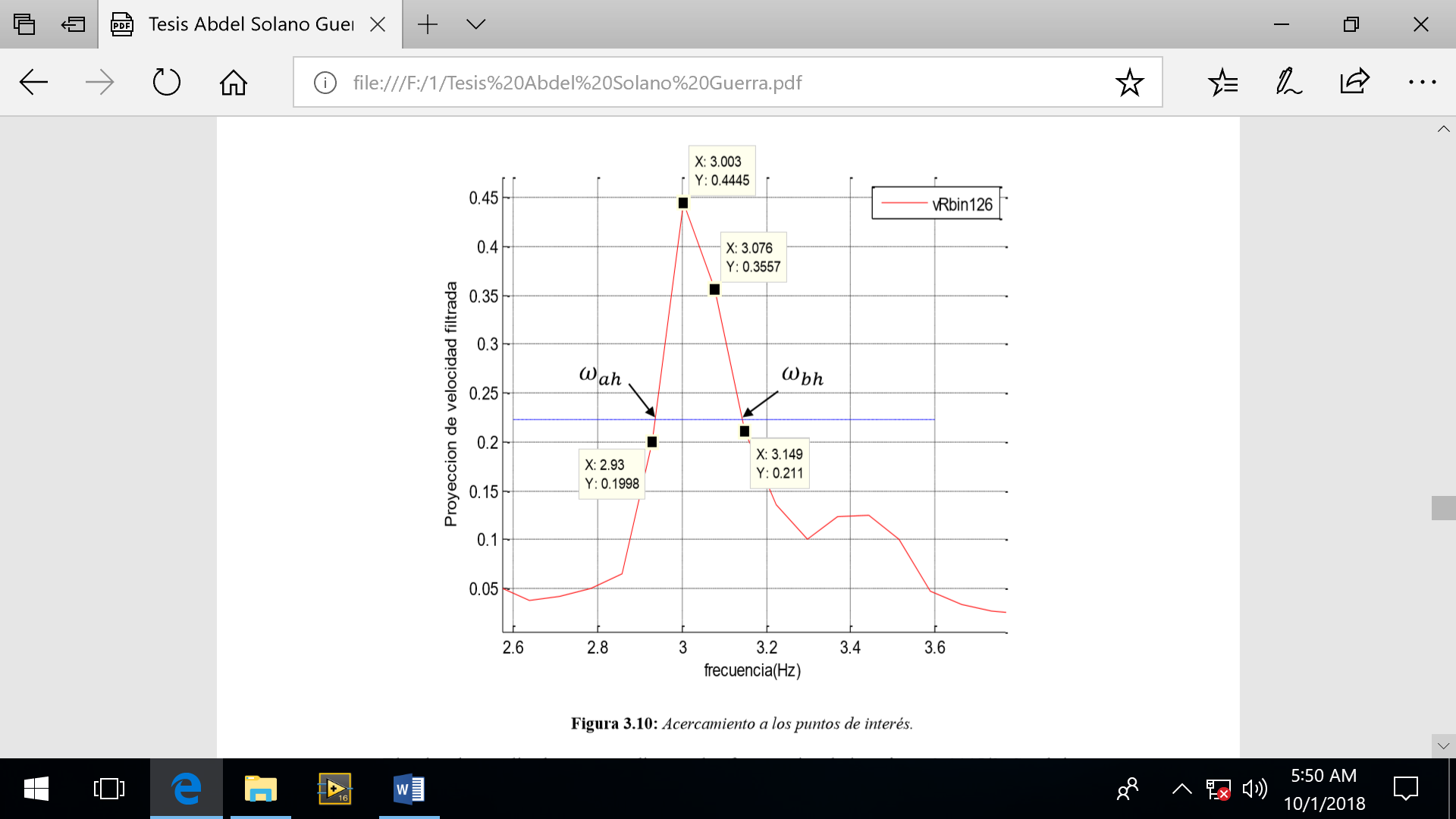
De acuerdo con el método de "recolección de picos" se puede ahora buscar las razones de amortiguamiento. Para ello; a partir de la obtención de las posiciones de los máximos en la proyección de la velocidad en el dominio de la frecuencia es necesario determinar las frecuencias correspondientes a los puntos de valor igual a la mitad del correspondiente al pico máximo en 𝜔𝑎 y 𝜔𝑏 de cada lado del pico identificado con amplitud máxima. Mediante el uso del MatLab se encontraron los valores de frecuencias del pico y las medias como se muestra en la Fig.3.7 debajo.



Un acercamiento a la zona de interés, considerando solamente la señal de velocidad en el punto Rbin126, por ser la de mayor amplitud, como se muestra en la Fig.3.9.



Los valores obtenidos a partir de la representación son los mostrados en la Fig.3.10:



El valor de amplitud correspondiente a las frecuencias de interés es 0.4445/2. Se obtiene un estimado de los valores de las frecuencias de interés mediante interpolación lineal considerando los valores más cercanos, indicados en la gráfica:

𝜔𝑟 = 3.003 𝐻𝑧, 𝐴𝑟 = 0.4445, 𝐴ℎ = 0.2223

𝜔𝑎1 = 2.93 𝐻𝑧 𝜔𝑎2 = 3.003 𝐻𝑧 𝜔𝑏1 = 3.076 𝐻𝑧 𝜔𝑏2 = 3.149 𝐻𝑧

𝐴𝑎1 = 0.1998 𝐴𝑎2 = 0.4445 𝐴𝑏1 = 0.3557 𝐴𝑏2 = 0.211

𝑚𝑎 = 𝐴𝑎2 − 𝐴𝑎1 𝑏𝑎 = 𝐴𝑎1 − 𝑚𝑎 × 𝜔𝑎1

𝜔𝑎2 − 𝜔𝑎1

𝑚𝑏 = 𝐴𝑏2 − 𝐴𝑏1 𝑏𝑏 = 𝐴𝑏1 − 𝑚𝑏 × 𝜔𝑏1

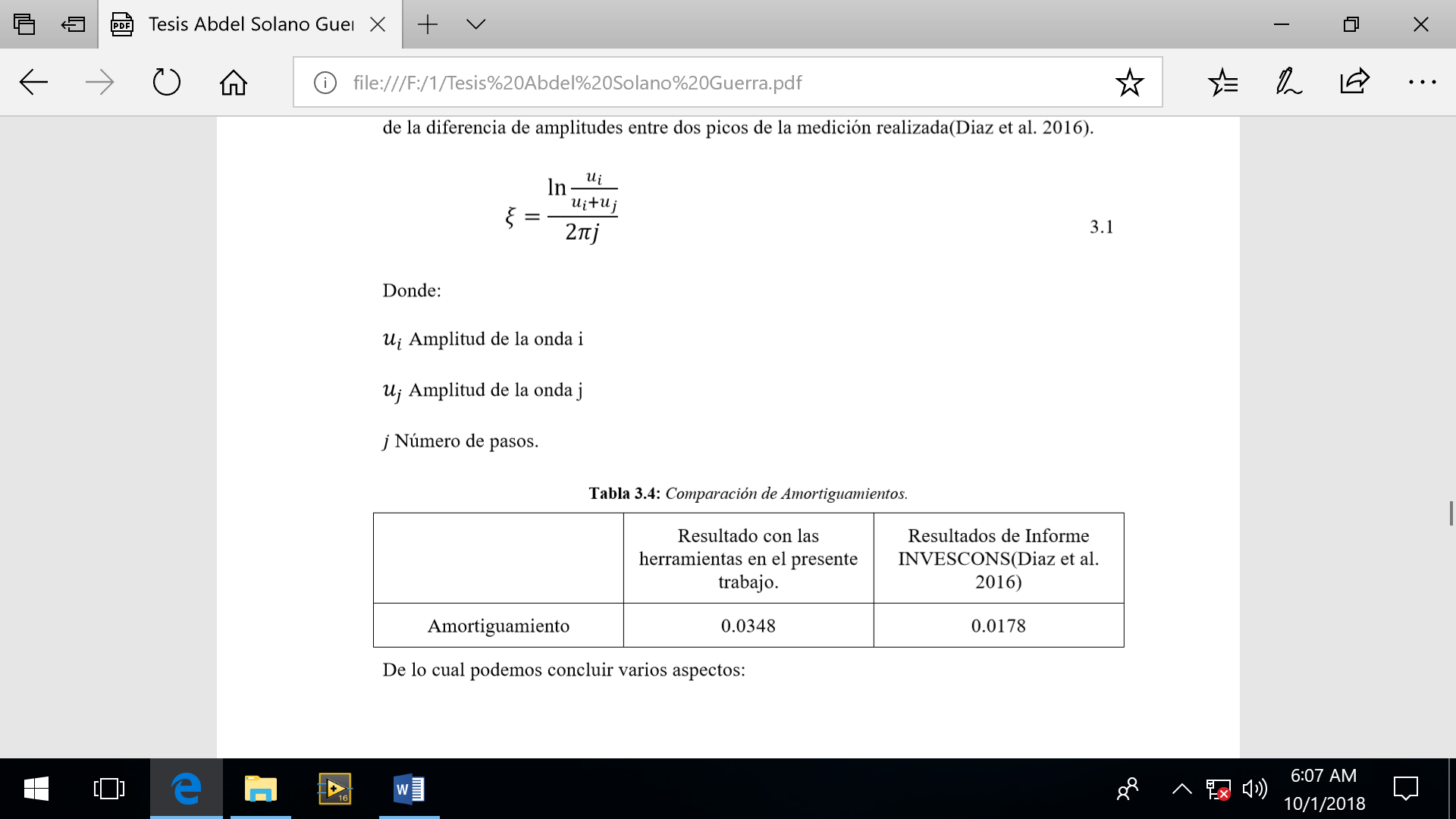
𝜔𝑏2 − 𝜔𝑏1

𝜔𝑎ℎ = (𝐴ℎ − 𝑏𝑎)/𝑚𝑎 𝜔𝑏ℎ = (𝐴ℎ − 𝑏𝑏)/𝑚𝑏

Resultados: 𝜔𝑎ℎ = 2.94 𝐻𝑧 𝜔𝑏ℎ = 3.14 𝐻𝑧

Como se muestra la Tabla 3.4 a modo de comparación con los resultados del análisis efectuado en el informe de INVESCONS donde los cuales obtuvieron el amortiguamiento de la siguiente manera.

Tomando como base la ecuación (3.1) (Chopra, 1980) que lo relaciona como una función de la diferencia de amplitudes entre dos picos de la medición realizada (Diaz et al. 2016).



De lo cual podemos concluir varios aspectos:

a. Los valores que se ofrecen en el informe de la ENIA (Diaz et al. 2016) son muy bajos, y realmente no corresponden con una estructura de H. A., incluso muy dañada. Los obtenidos por el método del semi-ancho de banda, corresponden mejor a la estructura medida.

b. Obviamente, el método del semi-ancho de banda es aplicable con mejores resultados a estos casos de oscilaciones forzadas, que el del decremento logarítmico, ya que en una medición en tráfico abierto resulta muy difícil de determinar cuál es la fase decreciente de las oscilaciones de manera exacta.

No se incluye el procesamiento de los modos, pues se cuenta con muy pocos puntos de señales y el informe de la ENIA tampoco los refleja.

**4. Conclusiones**

El método de promediado utilizando el método de Welch permite obtener resultados similares a los reportados en el informe. La configuración de parámetros utilizada favorece la exactitud en la estimación de los valores calculados a partir de la representación espectral de las señales de velocidad.

El empleo de la representación de las señales en el dominio de la frecuencia ofrece información adicional acerca de la calidad de las señales registradas, permitiendo detectar la presencia de señales ajenas al proceso que se desea analizar.

La utilización del filtrado en el pre procesamiento de las señales, como paso previo a su representación en el dominio de la frecuencia, apoya también la obtención de resultados más precisos.

El método de “Recolección de Picos” o “semi-ancho de banda” es aplicable con mejores resultados a estos casos de oscilaciones forzadas, que el del decremento logarítmico, ya que en una medición en tráfico abierto resulta muy difícil de determinar cuál es la fase decreciente de las oscilaciones de manera exacta.

Para el procesamiento de los modos se debe contar con más puntos de señales y con repetición de ellos al cambiarlos de posición al menos en varios puntos, cosa que no se hizo en el informe de la ENIA todos fueron puntos fijos.

**5. Referencias bibliográficas**

Acuña, C.A.G., 2002. Investigación del método fracción racional Polinómica para la extracción de parámetros modales a través de la técnica de impacto. Austral de Chile.

Angel, D.H., 2013. Identificación de las propiedades dinámicas de una estructura sometida a vibración ambiental empleando análisis espectral.

Cassano, A.M., 2009. Análisis de estructuras bajo acciones dinámicas.

Ceballos, M.A., 2004. Análisis Modal Experimental Aplicado a la Calibración de Modelos de Sistemas con Interacción Suelo-Estructura.

Claro Duménigo, A., 2015. Métodos para la modelación y el análisis experimental de puentes frente a cargas dinámicas.

Contreras, C.P.P., 2010. “Estudio Numérico Experimental de una Viga Agrietada .”

Diaz, R.R. et al., 2016. Informe técnico.Puente Boca de Jaruco.Diagnostico y Evaluación dinámica del tramo Gerber.,

Díaz, R.R. et al., 2015. Evaluación de un puente de vías férrea mediante ensayos estructurales y modelación computacional. , pp.32–43.

Eduardo, H.G.J., 2000. Introducción a la Dinámica de Estructuras I. S. B. . 958-9322-58-1, ed., Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.

G., F.L.B., 2011. Técnicas de optimización para la identificación de parámetros mecánicos de estructuras.

He, J. & Fu, Z.-F., 2001. Modal Analysis, 2001.

Losa Miranda, G., 2015. Tecnologías de sensorización e identificación modal. Aplicación a la determinación del amortiguamiento estructural. Universidad de Valladolid.

Luna, L.L.L., 2015. Ensayo a escala de edificios de dos alturas sometido a dezplazamientos horizontales.

Mardomingo, A.H., 2009. Análisis de los parámetros modales de una unión soldada. Carlos III de Madrid.

Meruane, V., 2014. Vibraciones Mecánicas. Apuntes para el curso ME4701.

Mora, L.D.J., 2013. Desarrollo de una aplicación de software para la determinación de parámetros modales orientada a la monitorización de salud estructural de puentes, basada en LabVIEW.

Obregón, C.F., 2013. Implementación y validación del método mejorado de descomposición en el dominio de la frecuencia (EFDD) para la identificación de los parámetros modales de estructuras genéricas utilizando ruido ambiente. Estudio del rango de aplicabilidad en función del.

Romero, H.M., 2014. Identificación de las propiedades dinámicas de una plataforma marina de perforación, basada en el monitoreo de vibraciones.

Sunico, M.R., 2005. Análisis modal operacional :teoria y practica.

Tejada, A. de M., 2011. Análisis Dinámico de Estructuras en el dominio de la frecuencia.