

**IMPLEMENTACION DEL MÓDULO DE CONTROL, ADQUISICIÓN Y  
PROCESAMIENTO DE DATOS PARA EL SHAKER SERIE 2075E,  
UTILIZADO EN EL ESTUDIO DINÁMICO DE EDIFICACIONES A ESCALA.**

**DARIO ALONSO RAMIREZ AMAYA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
SECCIONAL BUCARAMANGA ESCUELA DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2014**

**IMPLEMENTACION DEL MÓDULO DE CONTROL, ADQUISICIÓN Y  
PROCESAMIENTO DE DATOS PARA EL SHAKER SERIE 2075E,  
UTILIZADO EN EL ESTUDIO DINÁMICO DE EDIFICACIONES A ESCALA.**

**DARIO ALONSO RAMIREZ AMAYA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR A LOS TITULOS DE:**

**INGENIERO ELECTRONICO.  
INGENIERO CIVIL.**

**DIRECTORAS:**

**MSC: CLAUDIA LEONOR RUEDA GUZMAN  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRONICA**

**MSC: CLAUDIA PATRICIA RETAMOSO LLAMAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
SECCIONAL BUCARAMANGA ESCUELA DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2014**

*Ofrezco este trabajo a Dios,  
porque gracias a Él, alcance esta meta  
Ofrezco este trabajo a mis padres,  
quienes con su apoyo, permitieron que lograra  
este proyecto, culminando mis dos  
carreras Ingeniería Civil e Ingeniería Electrónica.  
A mi familia, por su apoyo incondicional  
en tierras extrañas, que me acogieron como propias.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera instancia, agradecer que en mi camino Dios sea mi guía y colocará, tantas personas que ayudaron a que se lograra esta meta con mucho esfuerzo y dedicación.

A la Facultad de Ingeniería Civil, quien confió en mi Directora Ing. Claudia Patricia Retamoso Llamas y en mí, para lograr con éxito, poner al servicio el laboratorio de Dinámica Estructural.

A mi Directora Claudia Patricia Retamoso Llamas, por brindar apoyo y compañía en este largo camino, arduo, pero con muchas alegrías al final.

A mi directora Claudia Leonor Rueda Guzmán, de la Facultad de Ingeniería Electrónica, quien me asesoró en toda la parte electrónica desarrollada en el proyecto.

A la facultad de ingeniería electrónica y mis docentes, por su acompañamiento y asesoría.

A los auxiliares del laboratorio de ingeniería civil e ingeniería electrónica, siempre estando prestos a brindar la mejor ayuda, de la forma más amigable y profesionalmente posible.

Al Dr. Gustavo Ospina Idarraga, quien con su llegada a la Universidad en enero de 2014, brindó un gran apoyo, para la evaluación de los modelos matemáticos, del proyecto.

A mis amigos de ambas titulaciones, quienes me acompañaron a lo largo de la vida académica, a mis profesores y demás que no recuerde, que siempre brindaron una mano amiga.

# Contenido

<b>UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA</b>	<b>1</b>
<b>1. OBJETIVOS.</b>	<b>11</b>
1.1. OBJETIVO GENERAL.	11
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	11
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>13</b>
2.1. ESTUDIO DEL SHAKER SERIE 2075E:	14
2.2. TARJETA DE ADQUISICIÓN DAQ:	14
2.3. PANEL DE CONTROL:	15
2.4. DESARROLLO DEL SOFTWARE DE CONTROL:	15
2.5. ENSAYOS DE FUNCIONALIDAD:	16
2.5.1. DETERMINAR EL AMORTIGUAMIENTO DE LOS MODELOS:	16
2.5.2. DETERMINAR LA RIGIDEZ DE LOS MODELOS:	16
2.5.3. SIMULACIONES Y ACTUALIZACIÓN DE MODELOS	16
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>17</b>
3.1. RELEVANCIA SOCIAL	17
3.2. APLICACIONES	17
3.3. VALOR TEÓRICO	17
3.4. CONVENIENCIA	18
<b>4. ALCANCE</b>	<b>19</b>
<b>5. ANTECEDENTES</b>	<b>20</b>
5.1. ANÁLISIS Y DISEÑO DE MODELOS ESTRUCTURALES PARA ENSAYOS EN MESA VIBRATORIA EDUCATIVA.	20
5.2. DISEÑO ACONDICIONADOR DE SEÑAL PARA UN SENSOR PIEZOELÉCTRICO	21
5.3. CONSTRUCCIÓN DE UNA MESA VIBRATORIA PARA SIMULAR SISMOS EN UNA DIRECCIÓN.	22
5.4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SIMULADOR SÍSMICO UNIAxIAL DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE.	23
<b>6. MARCO TEÓRICO.</b>	<b>24</b>

<b>6.1. MESAS VIBRATORIAS PARA ENSAYOS SÍSMICOS</b>	<b>24</b>
<b>6.2. PLATAFORMA MÓVIL:</b>	<b>25</b>
<b>6.3. ELEMENTO EXCITADOR (SHAKER 2075E):</b>	<b>25</b>
<b>6.4. TARJETAS DE ADQUISICIÓN NI-DAQ:</b>	<b>25</b>
<b>6.5. SENSORES DE ACELERACIÓN IEPE</b>	<b>26</b>
6.5.1. ACELERÓMETROS PIEZOELÉCTRICOS AC 135-2C	27
<b>6.6. ANÁLISIS DINÁMICO DE ESTRUCTURAS CON UN GRADO DE LIBERTAD.</b>	<b>28</b>
6.6.1. VIBRACIÓN LIBRE	29
6.6.2. VIBRACIÓN FORZADA AMORTIGUADA.	35
<b>6.7. MODOS DE VIBRACIÓN.</b>	<b>38</b>
<b>6.8. ENTORNO DE PROGRAMACIÓN LABVIEW.</b>	<b>39</b>
<b><u>7. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS (DAQ) SEGÚN LAS NECESIDADES DEL PROYECTO</u></b>	<b><u>41</u></b>
<b>7.1. MESA VIBRATORIA CON EL SHAKER 2075E.</b>	<b>41</b>
7.1.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.	41
7.1.2. SEÑALES DE ENTRADA (A).	42
7.1.3. PC CON LABVIEW (B)	43
7.1.4. COMUNICACIÓN SERIAL USB (C).	44
7.1.5. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DAQ (D).	44
7.1.6. SEÑAL ANALÓGICA DE CONTROL (E).	45
7.1.7. SMARTAMP 2100E21 (F).	45
7.1.8. SEÑAL DE POTENCIA PROPORCIONADA POR EL SMARTAMP (G).	46
7.1.9. ACTUADOR, SHAKER 2075E (H).	46
7.1.10. SEÑALES DE ACELERACIÓN (I)	46
<b>7.2. REQUISITOS PARA LA NI-DAQ</b>	<b>47</b>
<b>7.3. TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI-USB 6341 DE LA SERIE X</b>	<b>48</b>
<b><u>8. INSTALACIÓN DEL ACTUADOR, SHAKER 2075E</u></b>	<b><u>50</u></b>
<b><u>9. DISEÑO E INSTALACIÓN DEL PANEL DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS</u></b>	<b><u>53</u></b>
<b>9.1. DISEÑO DEL CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN IEPE PARA SENSORES PIEZOELÉCTRICOS.</b>	<b>53</b>
9.1.1. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA FUENTE DE CORRIENTE CONSTANTE.	54
9.1.2. DESACOPLE DE DC.	57
9.1.3. IMPLEMENTACIÓN DE LA PCB PARA EL CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN IEPE.	60
<b>9.2. DISEÑO DE LA CARCASA EN ACRÍLICO PARA LA PLACA BASE.</b>	<b>61</b>
<b>9.3. ESQUEMÁTICO FINAL DEL PANEL DE CONTROL Y ADQUISICIÓN.</b>	<b>62</b>
<b><u>10. SOFTWARE IMPLEMENTADO EN LABVIEW PARA EL MÓDULO DE VIBRACIONES</u></b>	<b><u>65</u></b>

<b>10.1.</b>	<b>NECESIDADES DEL SOFTWARE Y APLICACIONES PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO ESTRUCTURAL.</b>	<b>65</b>
<b>10.2.</b>	<b>VISTA GENERAL DEL SOFTWARE IMPLEMENTADO EN LABVIEW PARA EL MÓDULO DE VIBRACIONES.</b>	<b>66</b>
<b>10.3.</b>	<b>SUB MENÚS E INSTRUMENTOS VIRTUALES</b>	<b>69</b>
10.3.1.	SUB MENÚ “IMPORTAR DATOS”.	69
10.3.2.	SUB MENÚ “ACELERACIÓN T”.	72
10.3.3.	SUB MENU “VELOCIDAD T”	74
10.3.4.	SUB MENÚ “DESPLAZAMIENTO T”	76
<b>10.4.</b>	<b>CORRECCIÓN DE LÍNEA BASE.</b>	<b>79</b>
<b>10.5.</b>	<b>CONFIGURACIÓN DE LA DAQ 6341 PARA ADQUISICIÓN Y GENERACIÓN DE DATOS.</b>	<b>84</b>
<b>11.</b>	<b><u>MÓDULO DE VIBRACIONES, IMPLEMENTADO Y PRUEBAS DE VALIDACIÓN</u></b>	<b>87</b>
<b>11.1.</b>	<b>ENSAYOS DE VIBRACIÓN LIBRE.</b>	<b>88</b>
<b>11.2.</b>	<b>ENSAYO DE RESONANCIA.</b>	<b>90</b>
<b>11.3.</b>	<b>CALCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD.</b>	<b>91</b>
11.3.1.	CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD, MEDIANTE LA MEDICIÓN DE LA DEFORMACIÓN DE UNA VIGA SIMPLEMENTE APOYADA.	91
11.3.2.	DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD MEDIANTE EL ENSAYO DINÁMICO DE VIBRACIÓN LIBRE, PARA UN MODELO DE UN GRADO DE LIBERTAD.	98
<b>12.</b>	<b><u>CONCLUSIONES</u></b>	<b>107</b>
<b>13.</b>	<b><u>RECOMENDACIONES.</u></b>	<b>109</b>
<b>14.</b>	<b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b>	<b>110</b>
<b>15.</b>	<b><u>ANEXO A. MANUAL DE OPERACIÓN DEL MÓDULO DE VIBRACIONES.</u></b>	<b>112</b>
<b>16.</b>	<b><u>ANEXO B. CALCULO DE LA RIGIDEZ DEL MODELO DE ESTUDIO, EN SENTIDO DEL EJE Y</u></b>	<b><u>121</u></b>
<b>17.</b>	<b><u>ANEXO C. SIMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO EN, SIMULINK.</u></b>	<b><u>122</u></b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama de flujo actividades de la metodología. ....	13
Figura 2.	Mesa vibratoria comercial. ....	24
Figura 3.	Shaker serie 2075E .....	25
Figura 4.	Tarjetas DaQ National Instruments .....	26
Figura 5.	acondicionamiento de señal para sensor piezoelectrico .....	27
Figura 6.	Acelerómetro Serie Ac 135.....	27
Figura 7.	modelo equivalente para un sistema estructural de segundo orden.....	28
Figura 8.	Modelo libre no amortiguado.....	30
Figura 9.	Simulación del sistema libre no amortiguado en simulink.....	31
Figura 10.	Respuesta, libre no amortiguado.....	31
Figura 11.	Simulación sistema libre amortiguado .....	34
Figura 12.	Respuesta, sistema libre amortiguado. ....	34
Figura 13.	Factor de magnificación dinámica.....	36
Figura 14.	Simulación sistema forzado amortiguado. ....	37
Figura 15.	Respuesta sistema forzado .....	38
Figura 16.	Modos de vibración.....	38
Figura 17.	Entorno de programación Labview. ....	40
Figura 18.	Ejemplo de “vi” .....	40
Figura 19.	Esquema general ProtoMesa.....	41
Figura 20.	Acelerograma importado a labview .....	43
Figura 21.	Uso acelerogramas .....	43
Figura 22.	SmartAMP 2100E21.....	45
Figura 23.	Ni-USB 6341 .....	48
Figura 24.	Distribución de pines DAQ 6341 .....	49
Figura 25.	Curvas de carga, shaker 2075E.....	50
Figura 26.	Plataforma móvil y shaker 2075E (vista superior) .....	51
Figura 27.	Conexión SmartAmp – Shaker.....	51
Figura 28.	Diagrama esquemático del panel de control y adquisición .....	53
Figura 29.	Circuito de entrada para un canal NI-9234.....	54
Figura 30.	Referencia de corriente (Zero Temp Co) .....	55
Figura 31.	Señal de vibración sobre nivel de DC .....	57
Figura 32.	Circuito para el desacople de DC .....	58
Figura 33.	Diagrama de bloques filtro pasa altas. ....	59
Figura 34.	Simulación Filtro pasa altas .....	59
Figura 35.	Placa base.....	60
Figura 36.	Diseño carcasa para placa base.....	62
Figura 37.	Esquemático panel de control y adquisición .....	64
Figura 38.	Panel de control y adquisición implementado. ....	64
Figura 39.	Panel de control y adquisición, Cableado .....	64
Figura 40.	Menú principal.....	66
Figura 41.	Sub menú importar datos. ....	67
Figura 42.	Panel de programación del menú principal. ....	68
Figura 43.	Acelerograma en Excel.....	69
Figura 44.	Selección de Acelerograma. ....	70
Figura 45.	Datos importados a Labview. ....	70
Figura 46.	Sub Vi “importar datos” .....	71

Figura 47.	Panel de programación Sub Vi "importar datos".....	72
Figura 48.	Panel frontal "Aceleración T".....	72
Figura 49.	Panel frontal "Velocidad T".....	75
Figura 50.	Panel de programación sub menú "velocidad T".....	76
Figura 51.	Panel frontal "Desplazamiento T".....	77
Figura 52.	Diagrama de flujo para la reconstrucción de registro de desplazamientos.....	78
Figura 53.	Acelerograma de Northridge, Importado.....	79
Figura 54.	Velocidades de Northridge no corregidas.....	80
Figura 55.	Polinomio por mínimos cuadrados.....	81
Figura 56.	Diagrama de velocidades de Northridge corregido.....	81
Figura 57.	Diagrama de desplazamientos sin corregir.....	82
Figura 58.	Desplazamiento de Northridge corregidos.....	82
Figura 59.	Proceso para la configuración del canal de entrada o salida.....	84
Figura 60.	Sub menú "comunicación".....	85
Figura 61.	Configuración de salida análoga.....	85
Figura 62.	Configuración de entrada análoga (adquisición).....	86
Figura 63.	Modelos Sobre la mesa Vibratoria.....	87
Figura 64.	Set de estructuras Pasco.....	87
Figura 65.	Estructura de dos niveles.....	88
Figura 66.	Ensayo vibración libre.....	88
Figura 67.	Diagrama de frecuencias para modelo con dos grados de libertad.....	89
Figura 68.	Frecuencia aproximada a la fundamental.....	90
Figura 69.	Frecuencia aproximada al segundo modo de vibración.....	91
Figura 70.	Planteamiento del ensayo.....	92
Figura 71.	Montaje final del ensayo estático.....	92
Figura 72.	Estática del sistema.....	93
Figura 73.	Corte 1 de la Viga Analizada.....	94
Figura 74.	Diagrama Corte 2.....	94
Figura 75.	Diagrama Corte 3.....	95
Figura 76.	Diagrama Corte 4.....	96
Figura 77.	Modelo de un grado de libertad para ensayo dinámico.....	98
Figura 78.	Vibración libre, un grado de libertad.....	99
Figura 79.	Espectro, sistema de un grado de libertad.....	100
Figura 80.	Planta estructural del modelo.....	101
Figura 81.	Pórticos, 1x-1x, 2x-2x, 1y-1y, 2y-2y.....	101
Figura 82.	Perfiles viga y columna.....	101
Figura 83.	Matriz de rigidez elemento.....	102

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Propiedades electricas serie AC 135.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 1. Requisitos mínimos de instalación para el software Labview, en Windows .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 2. Características eléctricas del amplificador de potencia .....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 3. Características necesarias para la DAQ .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 4. Interpolación del acelerograma ejemplo .....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 5. Resultados, ensayo de deformación. ....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 6. Módulos de elasticidad en MPa .....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 7. Valores de inercia en m<sup>4</sup>.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 8. Factores Viga, pórtico 1x-1x.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 9. Rigidez viga, 1x-1x en función de E .....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 10. Factores columnas, pórtico 1x-1x .....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 11. Rigidez columnas, 1x-1x en función de E.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 12. Matriz de rigidez global del pórtico 1x-1x.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 13. Resultados módulo de elasticidad por ensayo estático y vibración libre .....</i>	<i>106</i>

## **RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TÍTULO:** IMPLEMENTACION DEL MÓDULO DE CONTROL, ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS PARA EL SHAKER SERIE 2075E, UTILIZADO EN EL ESTUDIO DINÁMICO DE EDIFICACIONES A ESCALA.

**AUTOR(ES):** Darío Alonso Ramírez Amaya

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR(AS):** Claudia Patricia Retamoso Llamas  
Claudia Leonor Rueda Guzmán

### **RESUMEN**

Uno de los factores que prueban al máximo la resistencia y confiabilidad de las estructuras son los movimientos sísmicos, que al desatarse elevan de forma estrepitosa el valor de los esfuerzos en todos los elementos estructurales, razón por la cual La Facultad de Ingeniería Civil, diseño y construyó el laboratorio de Dinámica Estructural, en el cual los fenómenos mencionados, se estudian a pequeña escala. Algunos de los métodos y parámetros descritos en este trabajo de grado, se basan en el análisis dinámico estructural, que es el estudio del conjunto de fuerzas, desplazamientos, velocidades y aceleraciones que se registran en una edificación después de aplicársele una fuerza externa variable en el tiempo. El laboratorio consta de una mesa vibratoria para simular entornos de vibración controlados y aplicarlos a modelos estructurales a pequeña escala. Para la fabricación de la mesa vibratoria se adquirió el vibrador electromecánico 2075e de la empresa Modalshop; para este se desarrolló un gabinete de control y adquisición integrando la tarjeta de adquisición de datos NI-DAQ 6341. Además el módulo de vibraciones consta de una plataforma móvil, acelerómetros piezoeléctricos para la realimentación de las variables en los modelos y un aplicativo diseñado en labview. Con este módulo será posible desarrollar ensayos de movimiento libre amortiguado y movimiento forzado amortiguado, en los cuales se podrá determinar la rigidez de los modelos, el amortiguamiento del sistema, periodos naturales de vibración, ensayos de resonancia, análisis de Fourier y al final realizar la actualización o calibración de los modelos teóricos de las estructuras a pequeña escala, estos últimos test son implementados para verificar el módulo de vibraciones implementado.

**PALABRAS CLAVE:** Dinámica, estructural, periodo, modo, vibración, resonancia, calibración, acelerometro, labview, control, fourier.

## GENERAL SUMMARY OF DEGREE WORK

**TÍTULO:** MODULE CONTROL IMPLEMENTATION, DATA ACQUISITION AND DATA PROCESSING FOR SHAKER 2075 E SERIES, USED IN THE STUDY OF DYNAMIC SCALE BUILDINGS.

**AUTHOR(S):** Darío Alonso Ramírez Amaya

**FACULTY:** Civil Engineering Faculty  
Electronic Engineering Faculty

**DIRECTOR(A):** Claudia Patricia Retamoso Llamas  
Claudia Leonor Rueda Guzmán

### ABSTRACT

Strength and reliability in structures are tested to their highest levels when earthquakes occur, these kind of events generate the highest stress levels in regular structures located in highly seismic zones. For this reason, the Civil Engineering Department at University Pontificia Bolivariana, designed and developed the structural dynamics laboratory, where the mentioned phenomenon can be scaled and studied. Several methodologies and parameters described in this document are based on structural dynamic analysis, which basically studies the response of structures when dynamics loads are applied. The developed laboratory consists of a shaking table for apply controlled vibrations over scaled structures. The setup of the table consists of a 2075e Modalshop electromechanical vibrator and an acquisition card NI-DAQ 6341. Piezoelectric accelerometers complete the setup of the shake table, which is controlled on a LabVIEW based application. The setup allows to implement dynamics tests such as forced and harmonic motion, from which structural parameters such as natural frequencies and damping values can be obtained. These tests are used to verify the vibration module developed.

**PASSWORD:** Dynamics, Structural, periods, vibration, modes, resonance, calibration, design, data acquisition, accelerometers, LabVIEW, Fourier.

## INTRODUCCIÓN.

La gran responsabilidad en la construcción de obras civiles exige a los ingenieros el diseño de estructuras que respondan de forma eficiente a los factores externos a las que son sometidas durante la vida útil del proyecto; como primer objetivo deben salvaguardar la vida de las personas que residen o transitan por estas y segundo deben generar confianza en aquellos que invierten su capital para la concepción de dichos proyectos. Es importante para la industria constructora en general, el éxito de cualquier tipo de obra civil, ya que muchas veces la complejidad de los proyectos no permite de manera eficiente establecer los causantes de las deficiencias en las estructuras. Una estructura colapsada o de baja calidad, termina involucrando de forma negativa a la industria de la construcción, lo que no genera confianza en los usuarios finales de los proyectos de edificaciones.

Desde la creación de la reglamentación sismo resistente colombiana (primero CCCSR-84, NSR-98 y por último NSR-10), la ingeniería civil en el país debió incorporarla al proceso de diseño de edificaciones; antes de estas reglamentaciones, el diseño solo se enfocaba en la estática de las estructuras lo cual generaba incertidumbre, sobre la capacidad que tenían las edificaciones, para soportar las cargas sísmicas. Por esto, se añadieron al diseño estructural estudios a fondo sobre el comportamiento dinámico de los edificios ocasionado por los movimientos sísmicos en la corteza terrestre.

La Facultad de Ingeniería Civil de la universidad Pontificia Bolivariana adquirió un equipo capaz de generar oscilaciones mecánicas con gran precisión, que puede simular un gran espectro de señales; este equipo es un Shaker serie 2075e de la compañía Modalshop, con el cual se busca generar entornos controlados de vibración en modelos a escala de estructuras civiles. Con la ayuda de la instrumentación necesaria, se analizará su comportamiento, sus modos de vibración y se compararan datos teóricos con los datos obtenidos en las pruebas, esto con la finalidad de afianzar los conocimientos teóricos adquiridos por los estudiantes en las asignaturas de Análisis Dinámico Estructural y Diseño de Edificaciones Sismo Resistentes.

Para generar en los estudiantes de ingeniería civil un amplio margen de conocimientos en dinámica estructural; la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga decidió realizar la construcción del laboratorio de dinámica estructural, que consta de una mesa vibratoria para simular entornos de vibración controlados y aplicarlos a modelos estructurales a pequeña escala.

Buscando que el sistema implementado sea robusto, duradero y amigable con los usuarios, previamente se decidió usar el lenguaje de programación

gráfico LabView de National Instruments como entorno de desarrollo para la interfaz gráfica de adquisición y control de datos; se requiere de hardware, una tarjeta de adquisición de datos DAQ, seleccionada analizando las necesidades del proyecto, buscando una excelente relación costo beneficio y que por consiguiente sea la más apta para suplir los requerimientos técnicos estipulados.

Con este módulo de vibraciones a los estudiantes les será posible desarrollar ensayos de movimiento libre amortiguado y movimiento forzado amortiguado, en los cuales podrán verificar variables de diseño como la rigidez experimental de los modelos, el amortiguamiento experimental del sistema, encontrar periodos naturales de vibración, ejecutar ensayos de resonancia, hacer análisis de Fourier y al final poder realizar la actualización o calibración de los modelos teóricos de las estructuras a pequeña, escala siendo este último el gran objetivo de la implementación del laboratorio de dinámica estructural.

## **1. OBJETIVOS.**

### **1.1. Objetivo General.**

Desarrollar una interfaz de control para el Shaker serie 2075e implementando la instrumentación necesaria para la captura de variables de vibración y desplazamiento de modelos a escala, usados en el análisis dinámico estructural.

### **1.2. Objetivos Específicos.**

Estudiar e instalar el Shaker serie 2075E, implementando aplicaciones básicas en LabView Signalexpress para verificar su funcionalidad y capacidad.

Seleccionar el sistema de adquisición de datos para LabView (DAQ); verificando que sea capaz de realizar la digitalización y la transmisión de información de cuatro señales de entrada analógicas provenientes de cuatro sensores de aceleración.

Implementar un panel de control físico que contenga una etapa de acople y acondicionamiento de señales para conectar satisfactoriamente los acelerómetros a la tarjeta de adquisición de datos; de la misma forma debe permitir conectar y desconectar de manera práctica los sensores o los canales de entrada usados en la DAQ.

Diseñar una interfaz gráfica en LabView para el control del Shaker, la adquisición, el procesamiento y el análisis de las variables de aceleración provenientes de la DAQ; que tenga la capacidad de mostrar gráficamente las variables capturadas.

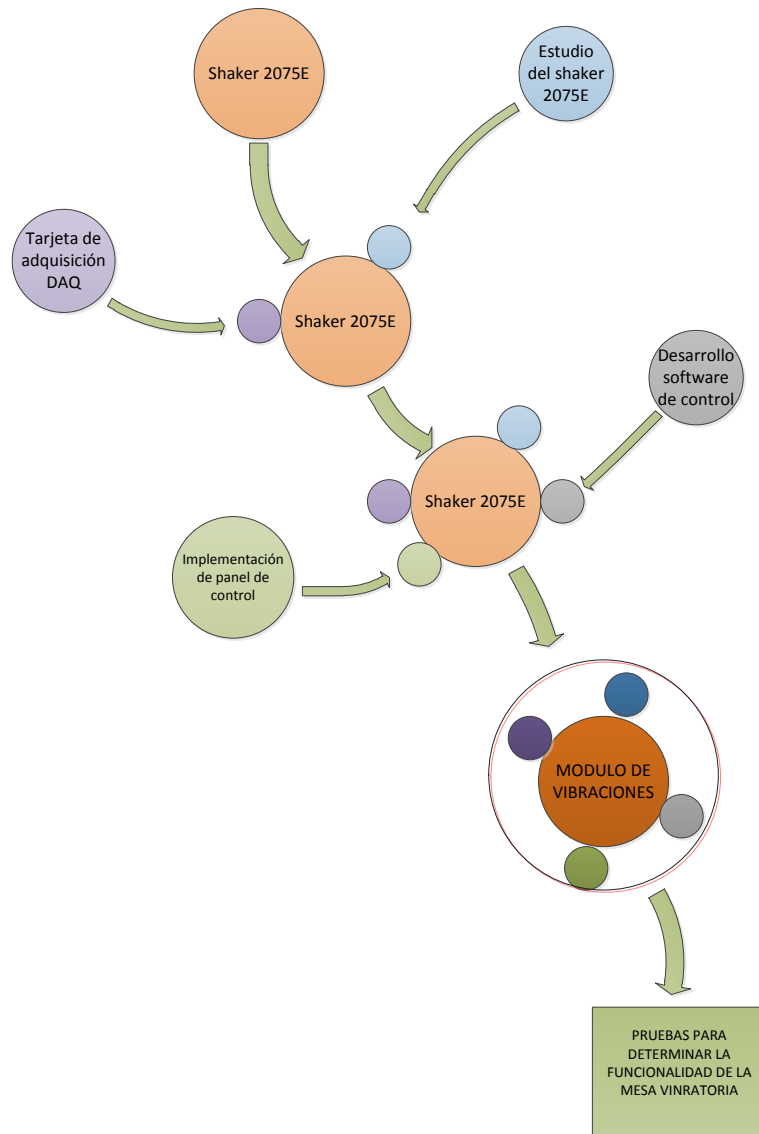
Diseñar una aplicación en LabView que permita encontrar el coeficiente de amortiguamiento de los sistemas analizados, con los datos obtenidos en la modelación del laboratorio del movimiento libre con amortiguamiento.

Diseñar un instrumento virtual en LabView que permita encontrar la rigidez estructural de los modelos a escala.

Realizar simulaciones en Simulink de los modelos matemáticos representativos de las edificaciones a escala y compararlos después con los resultados obtenidos en las pruebas.

## 2. METODOLOGÍA

Para la elaboración de la investigación, se diseñó y desarrollo una metodología que permitiera ir logrando cada objetivo, a continuación, en la Figura 1, se presenta el esquema organizacional del proyecto y una breve descripción de cada actividad.



**Figura 1. Diagrama de flujo actividades de la metodología.**

## **2.1. Estudio del Shaker serie 2075E:**

La instalación del equipo es algo que se debe hacer siguiendo las normas establecidas en los manuales del mismo; teniendo en cuenta que es un instrumento electromecánico de precisión es necesario tomar todas las medidas necesarias para garantizar su perfecto funcionamiento. Una vez realizada la instalación el siguiente paso será determinar los diferentes usos que se le pueden dar al equipo y ver cuáles son sus límites físicos como la carga máxima que puede soportar, el ancho de banda de las señales de control y los tiempos que pueden durar las pruebas sin que estas causen algún recalentamiento; para esto el manual facilita tablas y fórmulas con las cuales se pueden calcular estos factores que deberán ser probados en el equipo, con la ayuda de la herramienta SignalXpress de labview. Se podrán generar señales de control que siendo enviadas al equipo, por medio de la DAQ, ayudaran a observar la respuesta y funcionalidad del shaker.

## **2.2. Tarjeta de adquisición DAQ:**

La tarjeta de adquisición DAQ de National Instruments permite la interfaz entre el computador y el software de control enviaran las señales de excitación al shaker, y a la vez recibe las señales de aceleración provenientes de los acelerómetros instalados en los modelos. El parámetro usado para elegir la tarjeta adecuada es la frecuencia de muestreo de los convertidores análogo digitales y la frecuencia de escritura del convertidor digital análogo.

Desde el punto de vista de la adquisición, la tarjeta debe ser capaz de muestrear satisfactoriamente como mínimo 4 señales analógicas con frecuencias máximas de 500Hz, y amplitudes de entrada de entre 0 y 5 voltios; sería más práctico usar una tarjeta con canales de entrada independientes que posean un convertidor ADC por canal, que operen simultáneamente entre sí; pero por razones de costos resulta más factible una tarjeta que posea una frecuencia de muestreo lo suficientemente alta como para realizar una multiplexación de canales de entrada, sin ningún tipo de inconveniente.

Por otra parte, el objetivo de las señales de control es simular movimientos telúricos reales; por ende las frecuencias estimadas no superan los 100Hz y solo se necesita un canal de salida con tensiones entre 5 y -5 voltios para excitar el equipo.

### **2.3. Panel de Control:**

Para garantizar la robustez y confiabilidad del sistema se ha creado un panel de control que contenga los elementos vitales del módulo de vibraciones, como la tarjeta de adquisición DAQ, el amplificador de control del shaker, la fuente de alimentación que excite los sensores, los conectores BNC para los sensores y el cableado en general; el mecanismo debe permitir un fácil manejo de los canales de entrada de la DAQ, permitiendo cambiar de forma rápida el terminal al cual se desea conectar el sensor y a la vez debe servir como armazón de protección de todos los equipos electrónicos. El panel de control debe estar conectado al computador por medio de un puerto serial USB y al shaker por medio de los conectores de potencia provenientes del amplificador de potencia; además contiene un interruptor de stop ubicado visiblemente afuera del armazón y se conecta al amplificador de potencia con el fin de anular la ganancia de la señal de salida, y de esta forma detener la simulación en caso de cualquier emergencia.

### **2.4. Desarrollo del software de control:**

El software de control se desarrolla en LabVIEW con la finalidad de crear una interfaz gráfica amigable con los usuarios; el software contiene un menú con los siguientes ítems:

**Importación de datos:** en este ítem se podrán importar datos de acelerogramas escritos previamente en un archivo de planos; al importar el archivo deberá observarse gráficamente los datos de aceleración en una línea del tiempo similares a las de los registros sismográficos.

**Velocidad del terreno:** se calcula integrando en el tiempo los datos de aceleración importados previamente, se debe mostrar gráficamente.

**Desplazamiento del terreno:** se determina integrando la velocidad del terreno; es la variable final de control que irá al shaker para que este la reproduzca. Deberá tener un control de amplitud para que todos sus valores se encuentren entre los rangos admisibles de voltaje de salida y de esta forma se evite la saturación mecánica del equipo.

**Comunicación:** configura los canales de salida y de entrada de la DAQ según se requiera.

Simulación: empieza la transmisión de la señal de control hacia el shaker, y la recepción de las variables de aceleración provenientes de los modelos.

Ayuda: contiene archivos pdf (Ver Anexo A) con los cuales se tendrá una instrucción detallada del uso del software y el equipo.

## **2.5. Ensayos de funcionalidad:**

Son actividades específicas que se pueden desarrollar sobre los modelos estructurales una vez se haya implementado el módulo de vibraciones.

### **2.5.1. Determinar el amortiguamiento de los modelos:**

Los sistemas estructurales se pueden modelar como sistemas matemáticos de segundo orden, en los cuales sus propiedades más significativas son el amortiguamiento y la rigidez; partiendo de esto y de que el shaker puede aplicar una excitación conocida a los modelos se puede estudiar el comportamiento de los modelos en movimiento libremente amortiguado y midiendo el tiempo de establecimiento es posible determinar el amortiguamiento del sistema.

### **2.5.2. Determinar la rigidez de los modelos:**

Es posible determinar la rigidez física de un elemento estructural determinando su frecuencia natural de oscilación. Para calcular la frecuencia natural de oscilación será necesario realizar una prueba de resonancia donde el equipo aplicara señales sinusoidales; periódicamente aumentará la frecuencia de las mismas; tomando registro de las amplitudes promedios, se verá que la amplitud más alta corresponderá a la frecuencia natural debido a que el elemento entra en resonancia.

### **2.5.3. Simulaciones y actualización de modelos**

Una vez determinadas las variables de amortiguamiento y rigidez será posible construir un modelo matemático tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia; a esta función de transferencia característica del sistema se le podrían realizar pruebas en sistemas como simulink, con el fin de comprobar la certeza de los datos capturados; además podría ser comparada con ecuaciones características teóricas calculadas manualmente usando métodos algebraicos, lo cual será un método instructivo para comprobar los procedimientos teóricos.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

#### **3.1. Relevancia social**

El desarrollo de sistemas para el estudio dinámico estructural ayudará a incluir en el diseño de estructuras modernas parámetros que los cálculos convencionales han desechado sobredimensionando los factores de seguridad, aumentando el costo de la construcción y por ende el costo de vida; esto hace factible la investigación de métodos de diseño y estudios alternativos que ofrezcan al ingeniero de diseño una idea aproximada de cómo su estructura soportara cargas sísmicas. Además de asemejarse más a la realidad generan confianza, disminuyen costos y permite mejorar la seguridad ante cualquier evento inesperado.

#### **3.2. Aplicaciones**

Promover el desarrollo de estos sistemas en universidades para educar a los futuros ingenieros civiles en el análisis del comportamiento dinámico de sus estructuras; de esta forma el fenómeno sísmico será incluido con mucho detalle en el diseño estructural y el ingeniero podrá evaluar de manera práctica el resultado de su trabajo, así se disminuirán los daños a las estructuras y las posibles salidas de servicio de estas debido a las cargas sísmicas, aumentando la seguridad y la confianza de los diseños.

#### **3.3. Valor teórico**

Este sistema puede ser empleado como mecanismo para el desarrollo de diferentes tesis o proyectos de grados que tenga como fin el análisis dinámico y diseño estructural; por otra parte sería la base de futuros sistemas que podrían ser incorporados a edificaciones, lo cual permite tener, en tiempo real, una valoración del estado estructural observando la transmisión de las vibraciones mecánicas por la estructura.

Resultados obtenidos por la práctica en estos sistemas del análisis dinámico de las estructuras podrían ser fundamentales para realizar modificaciones a las reglamentaciones vigentes como el NSR-10 que puedan mejorar la seguridad y la certeza de lo que la reglamentación exige y recomienda.

### **3.4. Conveniencia**

Motivar a la industria de la construcción a buscar en las universidades herramientas y procedimientos que les ayuden a verificar la calidad y la confiabilidad de sus diseños, para que con toda certeza abarquen todos los requerimientos de seguridad y puedan dar a sus proyectos visto bueno de diferentes parámetros exigidos y otros recomendados por las normas de construcción sismo resistente.

#### 4. ALCANCE

En este proyecto se diseñó e implemento un sistema de mesa vibratoria, centrado en el uso del actuador shaker 2075e, con el fin de generar entornos controlados de vibración, que permitan a los usuarios realizar la modelación de estructuras a escala.

Por otra parte se marca un precedente sobre los aportes que pueden hacer las nuevas tecnologías en diferentes campos de la ingeniería; el uso de la instrumentación electrónica, el procesamiento de señales y la automatización de sistemas, permiten el desarrollo de equipos que generan alternativas rápidas y sencillas, al momento de querer realizar estudios e investigaciones.

Más centrados en el campo de la ingeniería civil, los sistemas electrónicos recién irrumpen y lo hacen en la academia, en donde se busca usar los mecanismos tecnológicos para corroborar y generar conocimientos, a la vez que se implementan nuevos sistemas que poco a poco podrán ir dando un salto hacia la industria.

El módulo de vibraciones desarrollado en el laboratorio de dinámica estructural de la Universidad Pontificia Bolivariana, se desarrolló con un variado número de aditamentos electrónicos, como las tarjetas de adquisición, que permiten digitalizar las variables provenientes de los sensores instalados en los modelos para su rápida visualización y posterior análisis en sistemas de cómputo. Los circuitos de adaptación de señal garantizan el buen funcionamiento del sistema de adquisición; y por último están los aportes de software desarrollados en Labview, los cuales son la programación de los diferentes instrumentos virtuales que se han desarrollado para el control del equipo.

Todo el conjunto de hardware y software que conforman la mesa vibratoria, son la base para el planteo de diferentes pruebas y ensayos dinámicos que se realizan en modelos estructurales a escala, muestra de esto son los diferentes ensayos de vibración libre y forzada que se desarrollaron durante la implementación del proyecto, que con ayuda de métodos matemáticos en el dominio del tiempo y la frecuencia , han arrojado resultados satisfactorios y congruentes, los cuales validan el funcionamiento del mecanismo implementado.

## 5. ANTECEDENTES

### 5.1. Análisis y diseño de modelos estructurales para ensayos en mesa vibratoria educativa.

Debido a la ubicación geográfica de la República del Salvador, esta es víctima constante de movimientos sísmicos de mediana y gran escala; de allí nace la necesidad de mejorar la comprensión que tienen los estudiantes de ingeniería de la UCA (Universidad de Centro América) sobre los movimientos telúricos, el comportamiento dinámico de las estructuras y los materiales que actúan bajo estas fuerzas externas.

En este trabajo han identificado los factores que afectan el comportamiento de las estructuras siguiendo un orden específico; como primera parte han identificado aquellos factores externos que alteran el estado estático de las estructuras, a pesar de que existen factores como las cargas de vientos y las fuerzas de impacto el parámetro en el que basaron todo el estudio fue el movimiento del terreno, el cual es causado por los propios movimiento telúricos que afectan la región. Los movimientos sísmicos serán simulados en una mesa vibratoria que produce movimientos sinusoidales diseñada por estudiantes de la misma institución.

Los otros factores son aquellos internos que son función de las propiedades mecánicas de la estructura, de la geometría de los elementos estructurales y su arquitectura.

Juntando ambos factores se obtendrá la respuesta de la estructura ante los movimientos sísmicos; hay diferentes formas de obtener la respuesta estructural, una de estas es resolver la ecuación diferencial característica del sistema utilizando métodos matemáticos, a este respuesta se le conocerá como valor teórico y está dado como una función en el dominio del tiempo. A partir del análisis dinámico y teniendo en cuenta factores como los económicos;, se pueden construir modelos de estudio que se asemejen a los utilizados en el análisis teórico, que sean económicamente viables y permitan una buena contextualización de todo los parámetros que refieren al análisis dinámico estructural.<sup>1</sup>

---

1 Gerardo E. Aguilar y Paola G. Melenez Análisis y diseño de modelos estructurales para ensayos en mesa vibratoria educativa. Trabajo de grado (Octubre del 2009 – Universidad Centro Americana “José Simeón Cañas”)

## 5.2. Diseño acondicionador de señal para un sensor piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico es la base en la que se fundamentan diferentes transductores de aceleración, y consiste en la liberación de carga eléctrica proveniente de cristales internos cuando estos son sometidos a algún esfuerzo; igualmente aparecen en ellos una deformación mecánica cuando se induce una tensión eléctrica.

Debido a su funcionalidad en la medición de vibraciones se dividen en medidores de alta media y baja frecuencia; la versión de alta frecuencia se usa en ambientes hostiles para monitorear la vibración en cojinetes cilíndricos, cajas de engranajes y bombas; la versión de frecuencias medias se usa para el monitoreo de bombas, motores, ventiladores, transportadores y el modelo de baja frecuencia es usado en el sector petrolquímico y en la medición de vibraciones estructurales causadas por sismos o maquinarias.

Para este acople del medidor piezoeléctrico a un sistema de visualización y medida digital que permite la abstracción y el procesamiento de la información tomada por el sensor, se usa un micro controlador del tipo pic16f877a con una de sus entradas conectadas a un amplificador en modo comparador. Se debe conectar la salida del sensor a la entrada no inversora del operacional que al saturarse mandará un impulso de salida ttl al micro controlador; al activar el contador por medio de un timer al micro se podrá analizar el tren de impulsos proveniente del amplificador de pulsos y contando estos se apreciarán la cantidad de vibraciones por segundo que sufre el sistema. Esta conexión es simple y se obtiene una muy buena información del sensor y con la posibilidad de un gran procesamiento de la señal si se proyectara esta aplicación para un DSP o desde el mismo micro controlador pic16f877a se pudiera llevar durante un protocolo de comunicaciones a una plataforma como LabView o Matlab.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Marcano Jennis, Rodríguez José Luís. "diseño acondicionador de señal para un sensor piezoeléctrico" lce. Internet: pdf.edocr.com/c0b1e2c44cda4eaa238814c0e6835b4813b9da5d.pdf , Oct. 05, 2005, consultado [Noviembre. 3, 2012].

### **5.3. Construcción de una mesa vibratoria para simular sismos en una dirección.**

El estudio de la dinámica estructural como cualquier otra rama de la ingeniería y la investigación, requiere de mecanismos reales que ayuden a probar y validar conocimientos y nuevas propuestas teóricas.

En el caso particular de los estudios dinámicos sobre estructuras civiles bajo acción sísmica, resulta indispensable crear entornos controlados de vibración que ayuden al ingeniero civil a observar el comportamiento real que tendrán sus diseños estructurales bajo las cargas sísmicas, esto con el fin de crear diseños que a pesar de poseer un buen fundamento bajo las leyes de la estática, también cumplan parámetros de seguridad dinámicos que ayuden a crear edificaciones más seguras que un futuro salvarán vidas y los intereses de sus propietarios.

En el año 2001 bajo este fundamento la universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga con la supervisión del ingeniero Samuel Montero Vargas y como investigador el ingeniero Víctor Javier Pimentel promovió un proyecto con el fin de crear un sistema de mesa vibratoria, en el cual se pudieran aplicar cargas sísmicas reales en una sola dirección a un mecanismo de péndulo simple; que tenía como objetivo encontrar variables de aceleración y desplazamiento sobre el modelo de prueba, usando como señales de excitación registros sísmicos conocidos de ciudades como Bucaramanga y Risaralda, los cuales previamente habían sido facilitados por Ingeominas.

Al comparar este proyecto con el desarrollo del módulo de vibraciones, se puede observar objetivos similares pero con la diferencia de que la mesa vibratoria del módulo de vibraciones implementada con el shaker 2075e permitirá la aplicación de un sin fin de excitaciones sobre los modelos, e incluso permitirá realizar la caracterización del mismo encontrando variables de rigidez, periodos naturales de oscilación y amortiguamiento del sistema, los cuales servirán posteriormente para crear un modelo matemático de los modelos que se pueda comparar con un modelo teórico.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Víctor J. Pimentel Trujillo. Construcción de una mesa vibratoria para simular sismos en una dirección. Trabajo de grado (Enero del 2001 – Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga)

#### **5.4. Diseño y construcción del simulador sísmico Uniaxial de la universidad del valle.**

El alto riesgo sísmico en Colombia hace factible el estudio de la respuesta estructural de toda edificación ante un movimiento telúrico, la complejidad de las estructuras es el motivo por el cual los moldeamientos matemáticos y teóricos deben ser adaptados e idealizados; esto causa cierta incertidumbre al momento de estudiar los diseños estructurales y realizar un cálculo de su capacidad. una forma de realizar ensayos con un alto grado de realismo es usando simuladores sísmicos, los cuales aplican sobre modelos estructurales a escala entornos de vibración, semejantes a los producidos por un movimiento sísmico; estos sistemas ayudan a los ingenieros a probar con certeza métodos constructivos que disminuyan el impacto que pueden causar las cargas sísmica a los edificios.

A pesar de que últimamente el avance en control estructural ha sido grande, incluso hasta llegar al punto de ser implementado en sistemas reales en países como Japón y nueva Zelanda; la mayoría de los ingenieros son reacios a usar e implementar nuevos sistemas estructurales y nuevos métodos constructivos debido a la poca experimentación que se hace previamente sobre estos; por lo tanto resulta indispensable la experimentación real sobre modelos reales y una forma de hacerlo es construyendo simuladores sísmicos que produzcan entornos serios de evaluación.

El simulador sísmico uniaxial es una mesa vibratoria que reproduce el movimiento sísmico en modelos estructurales. Con el simulador sísmico se busca aportar en la investigación de los diseños sismo resistentes.

El simulador sísmico realiza movimientos hasta los 50 Hz previniendo estar por encima de la frecuencia natural de la mayoría de los modelos; mecánicamente consta de una plataforma rígida, un sistema de rodamientos de baja fricción y un sistema hidráulico con frecuencias naturales mayores a los 50 Hz además se implementó bajo una red de aislamiento mecánico que busca separar las vibraciones del recinto, de las vibraciones de las pruebas..<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Gustavo A. Vargas, José E. Venegas y Peter Thomson. Diseño y construcción del simulador sísmico Uniaxial de la universidad del valle. Revista de ingeniería Uniandes Volumen 12. Páginas De las 55 a 58.

## 6. MARCO TEÓRICO.

### 6.1. Mesas vibratorias para ensayos sísmicos

La idea de este proyecto no es construir una mesa vibratoria como tal; sin embargo se busca desarrollar un sistema más pequeño pero que se base en el mismo principio y finalidad con el que se implementan estos equipos.

Las mesas vibratorias son equipos construidos con la finalidad de realizar pruebas sísmicas; los modelos que se pueden evaluar van desde los pequeños modelos a escala hasta modelos reales, esto depende de la capacidad y tamaño del equipo. Las mesas vibratorias son en su mayoría sistemas electro-mecánicos que constan de un bastidor sobre el cual se coloca un plataforma vibratoria que dependiendo del tipo, reposa sobre mecanismos mecánicos, hidráulicos o eléctricos quienes serán los encargados de aplicar las excitaciones mecánicas<sup>5</sup>; señales digitales son enviadas desde un ordenador a un controlador quien es el encargado de decodificar las señales y controlar el elemento excitador que pueden ser, válvulas, pistones o vibradores electrónicos como en el caso particular.



**Figura 2. Mesa vibratoria comercial.<sup>6</sup>**

<sup>5</sup> Mesa Vibradora ALPU. Internet: <http://www.miningmachinechina.es/3-6-shaking-table.html>, Oct. 25, 2000, consultado [Nov. 3, 2012].

<sup>6</sup> Imagen tomada de : <http://www.miningmachinechina.es/3-6-shaking-table.html>, consultado [Nov. 3, 2012]

## 6.2. Plataforma móvil:

La plataforma móvil de una mesa vibratoria debe ser infinitamente rígida, para que así pueda transmitir en su totalidad el movimiento a los modelos que reposarán sobre ella. Por otra parte, la plataforma rígida puede ser apoyada sobre rodamientos que generen poca fricción o colgada para así eliminar cualquier fuerza de rozamiento que pueda inferir en el control.

## 6.3. Elemento excitador (Shaker 2075E):

El Shaker serie 2075E, Figura 3, de modal shop es un excitador electrodinámico de imán permanente, compacto que permite aplicar cargas de hasta 334N (75lb) con señales sinusoidales; posee gran variedad de configuraciones gracias a su cabeza móvil que le otorga la capacidad de aplicar vibraciones horizontales o verticales según la necesidad. Su rango de movimiento es de una pulgada y su frecuencia útil es hasta los 6500Hz.



Figura 3. Shaker serie 2075E <sup>7</sup>

## 6.4. Tarjetas de adquisición Ni-DAQ:

Como la captura de las señales de vibración se hará por medio de una tarjeta de adquisición (DAQ) de National Instruments, hay que tener clara su funcionalidad y utilidad.

---

<sup>7</sup> Imagen tomada de : <http://www.modalshop.com/excitation/75-lbf-Dual-Purpose-Shaker?ID=251>, consultado [ jun 10, 2013]

Las tarjetas de adquisición de datos son equipos electrónicos que se pueden clasificar según su arquitectura y su funcionalidad; la arquitectura de las diferentes tarjetas que ofrece NI va desde aquellas que se comunican de forma serial con los equipos de cómputo hasta otras que lo hacen de forma inalámbrica, por otra parte también varían según el número de canales de entrada y salida tanto analógicos como digitales, las frecuencias de muestreo de los convertidores análogo digitales o si estos realizan muestreo simultáneo o simple (muestreo simultaneo indica que hay un ADC por canal). Según su utilidad National Instruments clasifica sus productos dependiendo de las variables de medición como se muestra a continuación:

- De Frecuencia
- De Corriente
- Digital
- Para Sensores IEPE
- Resistivos
- De Voltaje



**Figura 4. Tarjetas DaQ National Instruments <sup>8</sup>**

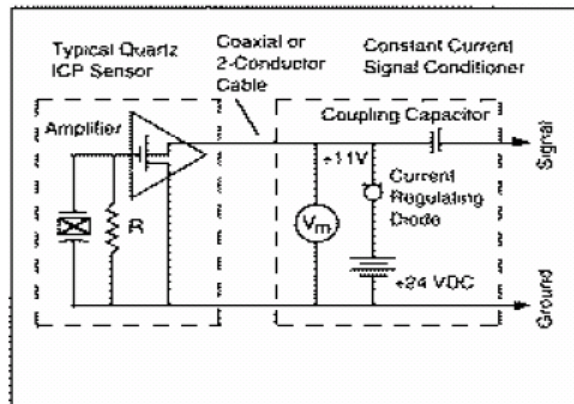
### **6.5. Sensores de aceleración IEPE**

Los sensores piezoeléctricos con conexión IEPE serán los utilizados en la medición de las variables de vibración de los modelos; estos sensores son los idóneos para el trabajo ya que su alta sensibilidad les permite tomar hasta los más mínimos valores de aceleración dentro de un gran espectro de frecuencia.

---

<sup>8</sup> Imagen tomada de : <http://sine.ni.com>, consultado [sep 7, 2013]

Los sensores de aceleración IEPE son sensores activos, por lo tanto necesitan una fuente de alimentación externa, que en este caso por ser piezoeléctrico se debe usar una fuente de corriente continua que excite el transductor; esta corriente depende del sensor y va desde los 2ma hasta 10ma.



**Figura 5. acondicionamiento de señal para sensor piezoeléctrico<sup>9</sup>**

En la Figura 5, se puede observar la fuente de corriente alimentando el circuito interno del sensor; el valor de la aceleración se mide en mili voltios en los terminales de la fuente de corriente.

### 6.5.1. Acelerómetros piezoeléctricos Ac 135-2c

Los sensores piezoeléctricos de la serie Ac 135 de la empresa CTC, son acelerómetros óptimos para trabajar en bajas frecuencias debido a su sensibilidad de 500mv/g.



**Figura 6. Acelerómetro Serie Ac 135.**

<sup>9</sup>Imagen tomada de:  
[http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10092/1/MEMORIA\\_CU64133.pdf](http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10092/1/MEMORIA_CU64133.pdf),  
 consultado [sep 7, 2013]

**Tabla 1. Propiedades electricas serie AC 135<sup>10</sup>**

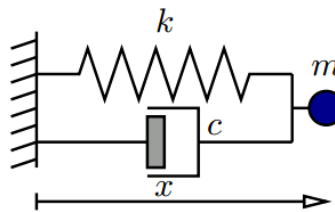
Propiedades Eléctricas		
Sensibilidad	500mv/g	10%+-
respuesta en frecuencia	0,6-1500hz	10%+-
Rango dinámico	10g pico +-	
requerimiento de tensino	18-30 vdc	
Temperatura máxima	121°C	

### 6.6. Análisis dinámico de estructuras con un grado de libertad.

Las estructuras con un grado de libertad se pueden modelar matemáticamente como un sistema masa resorte o un sistema de péndulo simple cuya ecuación representativa es de la forma.

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_0\dot{x} + \omega_0^2x = 0$$

**Ecuación diferencial característica de un sistema estructural de segundo orden**



**Figura 7. modelo equivalente para un sistema estructural de segundo orden.<sup>11</sup>**

Donde su respuesta depende del amortiguamiento del sistema  $\xi$ ; el cual está dado por las propiedades del terreno. La frecuencia natural de oscilación  $\omega_0$  que es función de la rigidez y la masa de la estructura de la siguiente forma.

<sup>10</sup> Hoja de datos acelerómetros Ac233 series, CTC Connection Technology Center, New York

<sup>11</sup> Imagen tomada de: <http://w3.mecanica.upm.es/~goico/docsismo/dinam.pdf>, consultado [ene 20, 2014]

$$W_o = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

### Frecuencia natural estructuras

A su vez la rigidez de la estructura K; es función de la inercia estructural; en otras palabras de la geometría de los elementos que conforman la estructura.

#### 6.6.1. Vibración libre

Para el análisis de movimiento en sistemas libres no se considera fuerza externa alguna; solo se analizan las condiciones iniciales del sistema en espacio, velocidad y aceleración, y la forma en como la estructura responde a dichas condiciones.

#### Vibración libre no amortiguada.

Físicamente son escenarios imposibles de realizar, debido a que la condición en la que no existen fuerzas que se opongan al movimiento del sistema solo es posible desde un punto de vista conceptual, igualmente es importante para entender conceptos fundamentales de la dinámica estructural, como las frecuencias fundamentales de oscilación.

$$m * \ddot{u} + k * u = 0$$

Partiendo de esta condición se puede obtener una solución general para la ecuación diferencial planteada donde:

$$u(t) = A * \cos(Wn * t) + B * \text{sen}(Wn * t)$$

De la ecuación anterior de desplazamiento se deduce que A y B son constantes que dependen del desplazamiento y la velocidad inicial del sistema; derivando la ecuación anterior se obtiene.

$$\dot{u}(t) = A * \text{sen}(Wn * t) + B * \cos(Wn * t)$$

La ecuación anterior representa las velocidades del sistema, ahora evaluando ambas expresiones para un t=0 se obtiene.

$$u(o) = A \quad \text{y} \quad \dot{u}(0) = B * Wn$$

Evaluando las condiciones anteriormente deducidas en la ecuación de respuesta para los desplazamientos del sistema, se escribe la ecuación de respuesta para el movimiento libre sin amortiguamiento, donde.

$$u(t) = u(0) * \cos(Wn * t) + \left[ \frac{\dot{u}(0)}{Wn} \right] * \text{sen}(Wn * t)$$

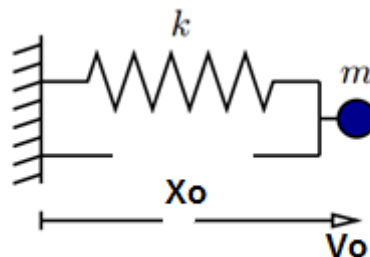
Donde  $u(t)$  es el desplazamiento del sistema,  $u(0)$  es la posición inicial,  $\dot{u}(0)$  es la velocidad inicial y  $Wn$  la frecuencia angular natural del modelo. Por otra parte es posible encontrar una expresión para el periodo del modelo partiendo de la relación donde  $Wn = \text{raíz}(k/m)$ .<sup>12</sup>

$$T = 2\pi * \sqrt{\frac{m}{K}}$$

**Ejemplo:** Sistema Libre no amortiguado

En el ejemplo siguiente se verificaran todas las expresiones anteriormente argumentadas.

Para este ejemplo se toma el sistema de la Figura 7 y se asume que  $C$ , la constante de amortiguamiento del modelo es 0, y no existe una fuerza externa que actúe sobre el modelo.



**Figura 8. Modelo libre no amortiguado**

Para el sistema de la Figura 8 se asume que.

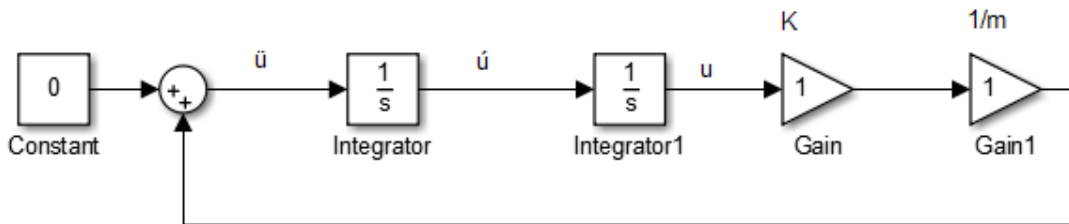
- $m = 1 \text{ kg}$
- $k = 10 \text{ N/m}$
- $Xo = 0,2 \text{ m}$

<sup>12</sup> Nicola Tarque Ruiz, Cesar Loaiza Fuentes; XVI curso internacional de estructuras, Análisis sísmico de edificios, Pontificia universidad católica de Perú, Octubre 2003

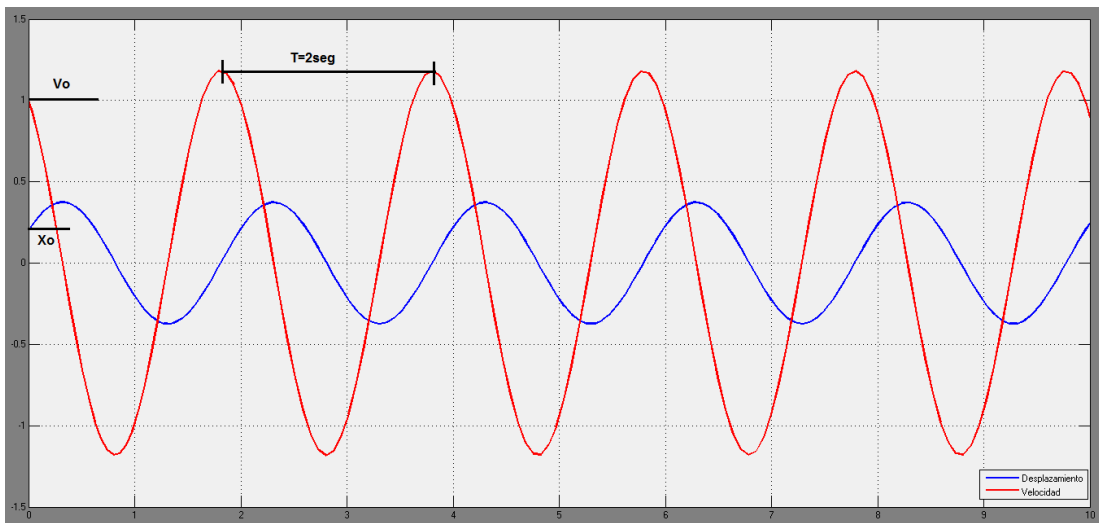
$V_0=1\text{m/s}$

Para las condiciones anteriores del modelo se obtiene la siguiente ecuación diferencial.

$$1kg * \ddot{u}(t) + \frac{10N}{m} * u(t) = 0$$



**Figura 9. Simulación del sistema libre no amortiguado en simulink.**



**Figura 10. Respuesta, libre no amortiguado**

De la simulación del modelo del ejemplo anterior se puede deducir que el periodo del sistema es de 2 seg y que para un  $t=2$ , que el modelo alcanza un desplazamiento máximo aproximado de 0,37m y una velocidad máxima aproximada de 1,2m/s. estos valores se pueden verificar usando las expresiones de los numerales anteriores.

$$T = 2 * \pi * \sqrt{\frac{1}{10}} = 1,986 \text{ seg}$$

$$Wn = \sqrt{\frac{10}{1}} = 3,16$$

$$A = 0,2m$$

$$B = 1/3,16 = 0,316$$

$$U_{max} = \sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{0,2^2 + 0,316^2} = 0,373m$$

### **Vibración Libre amortiguada.**

En la realidad todos los sistemas mecánicos se conciben como sistemas con un grado de amortiguamiento, ya que si no fuera así, dichos sistemas oscilarían permanentemente y nunca alcanzarían el reposo.

Asumiendo que el sistema ahora posee cierto grado de amortiguamiento viscoso, la ecuación diferencia característica de estos sistemas sería.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0$$

La constante de amortiguamiento C, corresponde a la energía que se pierde gradualmente durante cada ciclo de oscilación del sistema; para la ecuación anterior existen 3 posibles soluciones dependiendo del grado de amortiguamiento.

$$\xi = \frac{C}{Cr}$$

$$Cr = 2 * m * Wn$$

Si  $\xi=1$ , es porque  $C=Cr$ , y el sistema se considera críticamente amortiguado; en este caso no se considera una vibración, pues el modelo no oscilara antes de llegar a su posición de reposo.

Si  $\xi>1$ , es porque  $C>Cr$ , y el sistema se considera supercrítico, en este caso no ahí ningún tipo de oscilación y el modelo disipara la energía cinética rápidamente mientras vuelve a su posición de reposo.

Si  $\xi<1$ , es porque  $C<Cr$ , y el sistema se considera subcritico, el modelo oscilara hasta llegar a la posición de reposo, y es el caso a estudiar cuando de dinámica de edificaciones se trata.

Considerando que la respuesta del sistema es subcritica, la respuesta característica para la ecuación será.

$$u(t) = e^{-\xi * \omega_n * t} (A \cos(\omega_D t) + B \operatorname{sen}(\omega_D t))$$

El término  $\omega_D$  representa la frecuencia circular de las oscilaciones amortiguadas, y se determina con:

$$\omega_D = \sqrt{(1 - \xi^2) * \omega_n}$$

Al igual que en el caso anterior A y B son constantes que siguen dependiendo de las condiciones iniciales del sistema de la siguiente manera.<sup>13</sup>

$$A = u(0)$$

$$B = \frac{\dot{u}(0) + u(0) * \xi * \omega_n}{\omega_D}$$

**Ejemplo:** sistema libre amortiguado.

En este ejemplo se busca realizar la simulación del sistema anterior, esta vez añadiendo el amortiguamiento viscoso al modelo como se observó en la Figura 7.

Para este ejemplo se asume que:

$$m=1\text{kg}$$

$$k=10\text{N/m}$$

$$C=1$$

$$X_0=1\text{m}$$

$$V_0=1\text{m/s}$$

Para las condiciones anteriores del modelo se obtiene la siguiente ecuación diferencial.

$$1\text{kg} * \ddot{u} + 1 * \dot{u} + \frac{10\text{N}}{m} * u = 0$$

---

<sup>13</sup> Nicola Tarque Ruiz, Cesar Loaiza Fuentes; XVI curso internacional de estructuras, Análisis sísmico de edificios, Pontificia universidad católica de Perú, Octubre 2003

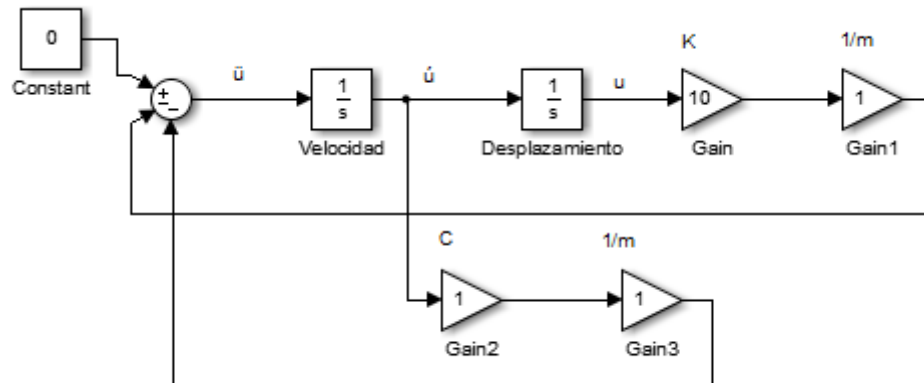


Figura 11. Simulación sistema libre amortiguado

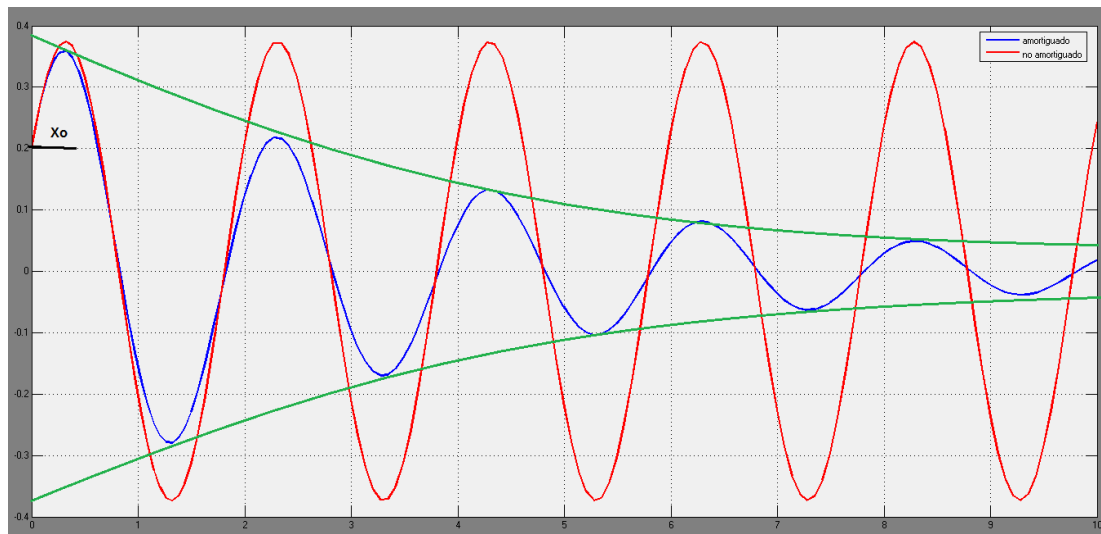


Figura 12. Respuesta, sistema libre amortiguado.

$$Wn = \sqrt{\frac{10}{1}} = 3,15$$

$$Cr = 2 * 3,15 * 1 = 6,3$$

$$\xi = \frac{1}{6,3} = 0,158 \text{ Sistema subcritico}$$

En conclusión los sistemas subcriticos, producen oscilaciones de igual periodo que en el modelo no amortiguado, pero con amplitudes decrecientes dependiendo de la constante de amortiguamiento viscoso del modelo.

### 6.6.2. Vibración forzada amortiguada.

Se asume una excitación externa armónica que es de la forma.

$$P(t) = P_o * \text{Sen}(wt)$$

Donde  $P_o$  es la magnitud máxima de la fuerza aplicada que varia en el tiempo a razón de la función  $\text{Sen}(Wt)$ ; de esta manera la ecuación diferencial característica de los sistemas forzados seria de la forma,

$$m * \ddot{u} + c * \dot{u} + k * u = P_o \text{Sen}(wt)$$

Para esta ecuación diferencial no homogénea la respuesta se encuentra en función de una respuesta libre amortiguada y una respuesta forzada inducida por la función  $P(t)$ , tal como se muestra a continuación.

$$u(t) = u_{max} * \text{sen}(wt + \emptyset)$$

y

$$u_{max} = \left(\frac{P_o}{k}\right) * [(1 - \beta^2)^2 + (2 \xi \beta)^2]^{-1/2}$$

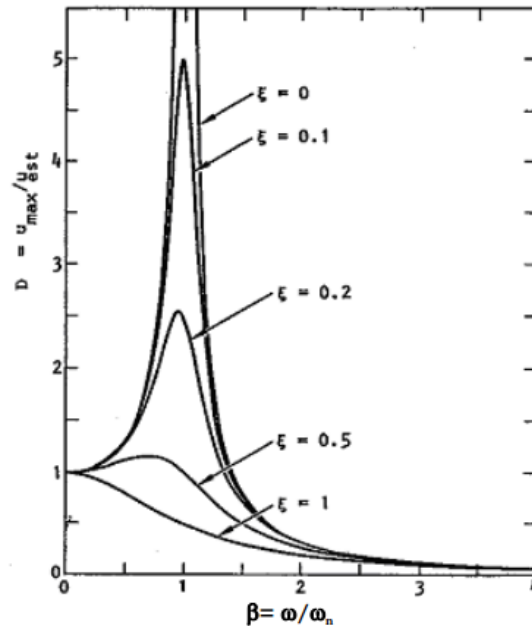
Para el cual  $\beta$  es la relación entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural del sistema

$$\beta = \frac{w}{w_n}$$

$\emptyset$  Es el Angulo de desfase que existirá entre la señal armónica de entrada y la respuesta del modelo.

$$\emptyset = \text{atan} [2 \xi \beta / (1 - \beta^2)]$$

Partiendo del análisis de las expresiones anteriores se puede concluir, que al aplicarse un movimiento armónico a un modelo amortiguado, la respuesta que se obtendrá es una onda de similar frecuencia que la aplicada, con un corrimiento en fase y amplificadas o disminuidas según la relación  $\beta$  o el factor de magnificación dinámica como se muestra en la siguiente Figura 13.



**Figura 13. Factor de magnificación dinámica**

De la gráfica anterior se puede analizar que si la relación es  $\beta \ll 1$  la respuesta del modelo se acerca a la respuesta estática, por lo tanto se puede despreciar la respuesta dinámica, y la fuerza aplicada no tendrá ningún efecto sobre el sistema.

En el otro caso de que la relación sea  $\beta \gg 1$  la respuesta dinámica tiende a 0, en este caso se considera que la masa de la estructura controla la respuesta del sistema.

Por otra parte, para valores de frecuencias de excitación cercanas o iguales a la frecuencia natural del sistema donde  $\beta$  es *aproximadamente* 1 el factor de magnificación crece enormemente, y más aún si el amortiguamiento del sistema es bajo, este escenario se conoce como escenario de resonancia y es el que representa un mayor peligro para la integridad de las edificaciones ya que las deformaciones en la estructura son máximas.<sup>14</sup>

**Ejemplo:** sistema forzado amortiguado.

<sup>14</sup> Anil K. Chopra; Dinámica de estructuras, teoría y aplicaciones, (4ta edición) Editorial Pearson

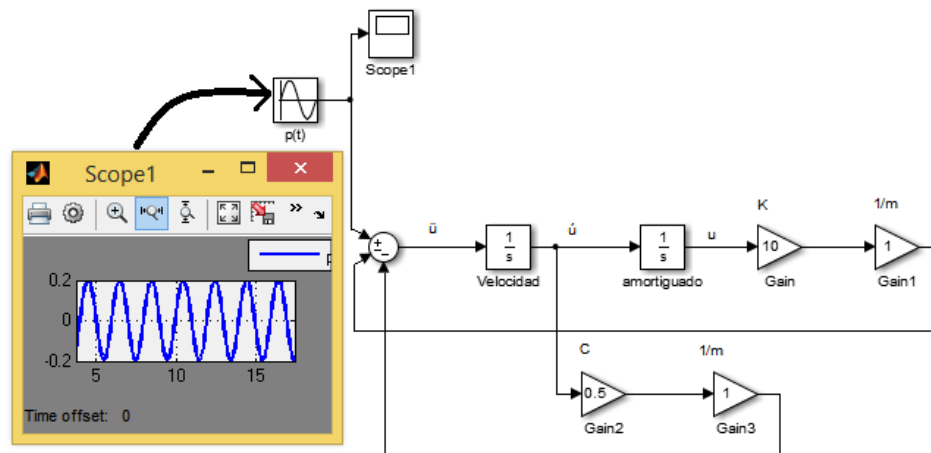
Considere el mismo sistema del ejemplo anterior al que esta vez se le aplicara una carga armónica de la forma.

$$P(t) = 0.2 * \text{sen}(wn * t)$$

La ecuación diferencial característica se escribe de la siguiente manera.

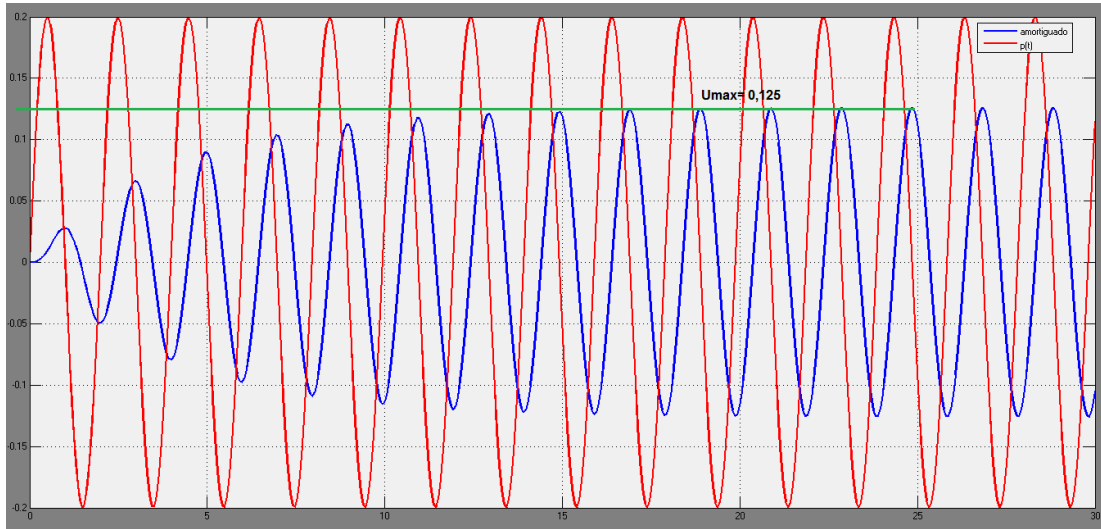
$$1kg * \ddot{u} + 1 * \dot{u} + \frac{10N}{m} * u = 0.2 * \text{sen}(3.16 * t)$$

Así garantizando que  $\beta=1$  y se obtendrán los máximos desplazamientos posibles por el sistema.



**Figura 14. Simulación sistema forzado amortiguado.**

Como predijo la teoría para estos tipos de sistemas, la respuesta del modelo depende de la señal de entrada que solo se encuentra desfasada y posee una amplitud máxima que depende del factor de magnificación dado por  $\beta$  y el amortiguamiento del sistema.



**Figura 15. Respuesta sistema forzado**

### 6.7. Modos de vibración.

Al igual que todos los materiales, las estructuras también poseen diferentes formas de vibrar, al momento de enfrentar una carga dinámica aplicada por un terremoto, y dependiendo de estas la estructura puede resultar afectada en mayor y menor medida



**Figura 16. Modos de vibración.<sup>15</sup>**

En la Figura 16 se muestran los 3 modos de vibración posibles para una estructura de 3 niveles, donde el primer modo se conoce como fundamental y ocurre cuando la estructura vibra de lado a lado sin nodos de deformación intermedios

<sup>15</sup> Imagen tomada de: Laboratorio de Ingeniería Sísmica del Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII), Universidad de Costa Rica; <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=527>, consultado [ene 25, 2014]

## 6.8. Entorno de programación Labview.

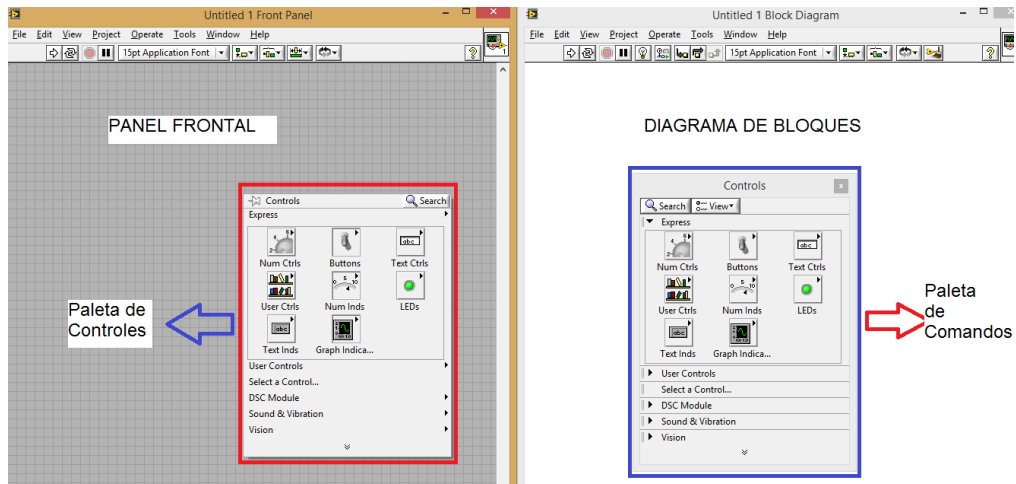
(Acrónimo de Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench)  
Labview es un entorno de programación gráfico basado en lenguaje “G” el cual permite estructurar gran variedad de aplicaciones, y es ideal para aquellos sistemas que tienen como objetivos la medición y el control.

Los programas desarrollados en labview se denominan “Vis” o instrumentos virtuales; una de las ventajas más grandes de labview es su adaptación a los nuevos sistemas de cómputo tanto en software y hardware esto se ve en su amplia gama de interfaces de comunicación como se ve a continuación.

- Puerto serie
- Puerto paralelo
- GPIB
- PXI
- VXI
- TCP/IP, UDP, DataSocket
- Irda
- Bluetooth
- USB
- OPC...

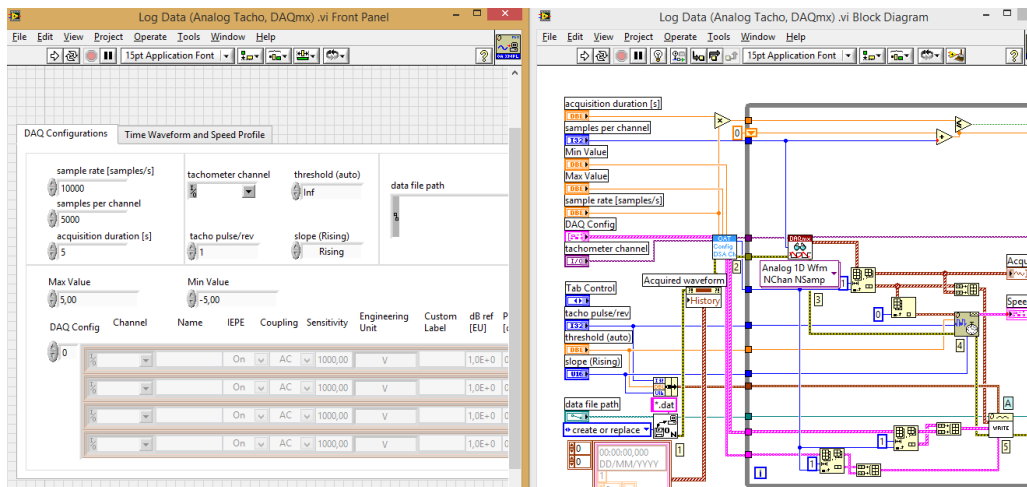
Esta variedad de interfaces permite la conexión de un gran número de sistemas electrónicos de adquisición a los instrumentos virtuales diseñados en Labview.

Labview consta de dos paneles de programación, uno frontal y un diagrama de bloques, como se muestra a continuación.



**Figura 17. Entorno de programación Labview.**

En el panel frontal se colocan elementos virtuales de interacción como botones, pulsadores, entradas de texto, perillas entre muchos otros y elementos de visualización como medidores, barras y cuadros de gráficos; todos estos bloques de interacción se entrelazan entre si en un código o diagrama de bloques, programado en el mismo panel de programación; de esta forma al ejecutarse un instrumento virtual se manipula este desde el panel frontal.



**Figura 18. Ejemplo de "vi"**

## 7. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS (DAQ) SEGÚN LAS NECESIDADES DEL PROYECTO

Antes de empezar a discutir sobre cuál es el sistema óptimo de adquisición y generación de datos (DAQ) dentro de la gran gama de dispositivos que ofrece National Instruments para Labview, es necesario describir de forma detallada la estructura y funciones del módulo de vibraciones con el objetivo de detectar las verdaderas necesidades de hardware y software en la implementación del sistema.

### 7.1. Mesa vibratoria con el shaker 2075E.

La siguiente figura se muestra la estructura prototipo de la mesa vibratoria.

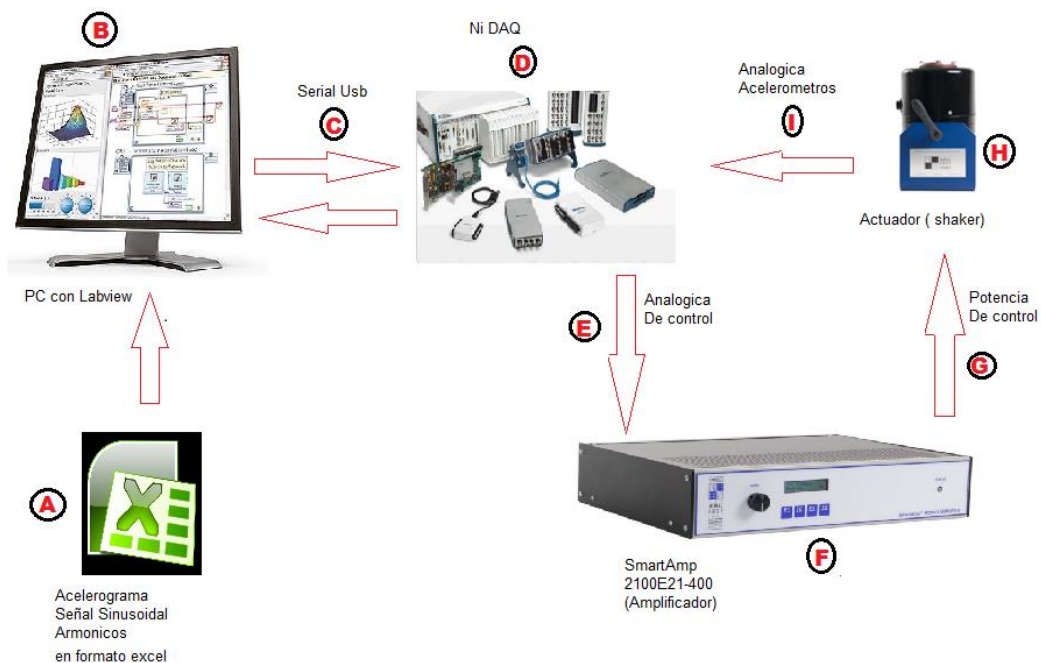


Figura 19. Esquema general ProtoMesa

#### 7.1.1. Descripción general.

El objetivo del sistema es generar una gran variedad de movimientos con diferentes amplitudes y frecuencias en el actuador electromecánico (H), estos movimientos serán aplicados por medio de una plataforma a modelos estructurales a escala con la finalidad de someterlos a un entorno controlado de vibración.

Las señales de entrada (A) pueden generarse desde el mismo Labview, o ingresarse al sistema en forma de archivos de Excel que al ser importados al programa son reconstruidos y enviados de forma serial a la DAQ (D) con la finalidad de convertirlos en señales analógicas de control que pueden variar entre -10v y +10v; Luego esta señal de control es enviada al SmartAmp (Amplificador) necesario para la operación del shaker y proporcionado por el mismo fabricante (Modal Shop), el SmartAmp convierte esta señal de control en una señal equivalente de potencia apta para alimentar el actuador, que en este caso es un motor de armadura con un complejo sistema mecánico.

El shaker 2075e puede operar en lazo abierto produciendo una excelente respuesta en frecuencia debido al control interno que lleva a cabo el SmartAmp sobre la potencia inyectada al motor; sin embargo en aplicaciones donde es estrictamente necesario el control de amplitud de los desplazamientos del cabezal móvil del shaker, se realiza una realimentación (I) hacia el software de control por medio de una señal proveniente de los acelerómetros instalados en el cabezal móvil del equipo.

El prototipo de la mesa vibratoria consta de 5 elementos de hardware comunicados entre sí, por diferentes protocolos y señales de control, la descripción de los elementos y dichas señales según la Figura 19 se muestra a continuación.

### **7.1.2. Señales de entrada (A).**

Como se mencionó anteriormente las señales de entrada pueden generarse en el mismo software de control o pueden ser importadas desde archivos de Excel que contengan los datos de los acelerogramas que se deseen simular en el equipo. Los armónicos generados directamente desde labview son sencillos de implementar y ya existen aplicaciones virtuales como el “Labview signalExpress” que permite generar señales sinusoidales de cualquier frecuencia con la limitante de amplitud que genera la tarjeta de adquisición de datos (DAQ); hay que tener en cuenta que el shaker 2075e está diseñado para oscilar en frecuencias entre el DC hasta los 6kHz, sin embargo en aplicaciones para el análisis dinámico estructural de modelos a escala, estas señales armónicas no superan los 50Hz, y es en este rango que se empleara el equipo.

Por otra parte al tratar de generar simulaciones de acontecimientos reales es importante recalcar que los sismos son movimientos aleatorios que comprenden un gran número de armónicos mezclados entre si; estos datos son recopilados por los sismógrafos de las instituciones encargadas para su posterior estudio y luego son presentados en forma de acelerogramas, que

no son mas que un numero finito de parejas de datos de tiempo y aceleración como se muestra a continuación.

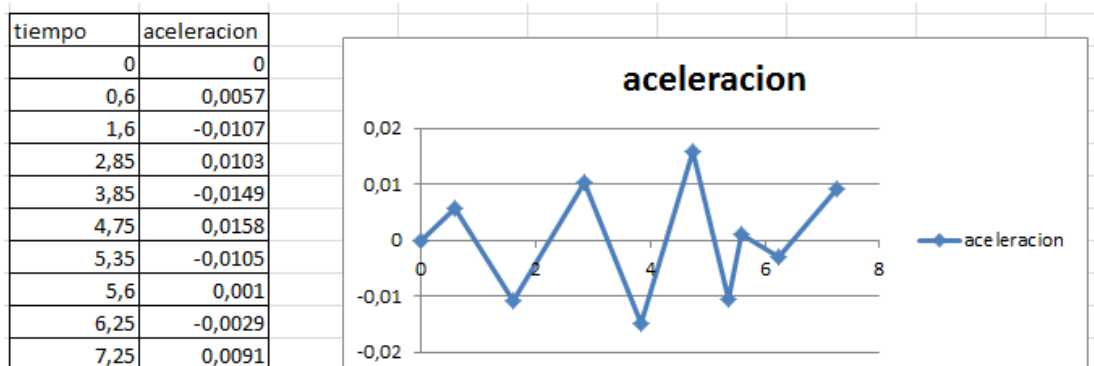


Figura 20. Acelerograma importado a labview

Los acelerogramas son llevados al equipo buscando realizar una simulación a pequeña escala de un movimiento telúrico real.

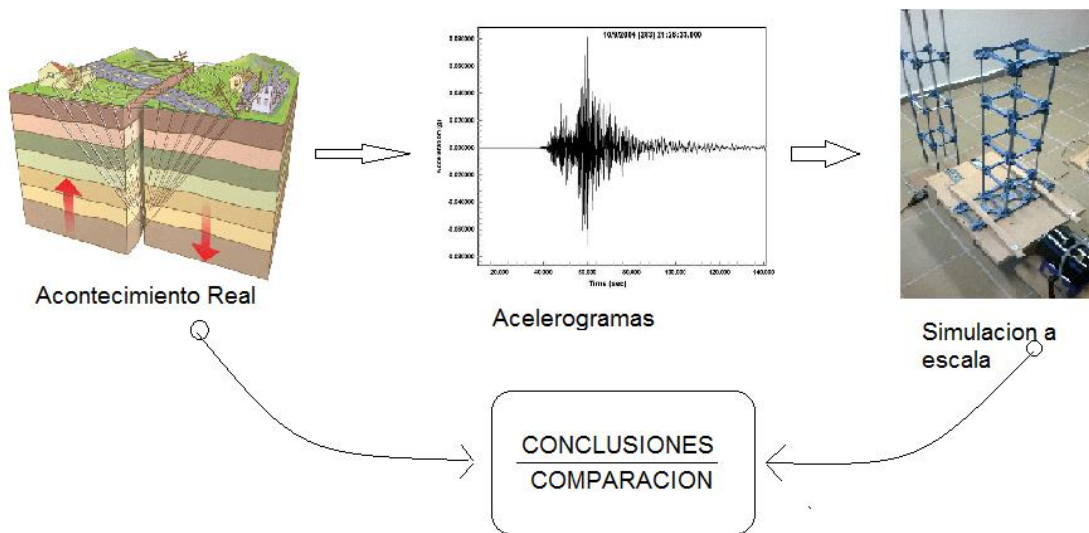


Figura 21. Uso acelerogramas

### 7.1.3. Pc con Labview (B)

El equipo de cómputo ejecuta el software de adquisición y control implementado en Labview. Aunque labview no requiere grandes requisitos de hardware para su operación, es necesario para el sistema un equipo de cómputo con gran capacidad de procesamiento, ya que el mecanismo de “flujo de datos” que es la forma como se ejecutan los instrumentos virtuales

“Vis” en labview, vuelve dependiente de la velocidad de procesamiento del equipo, la velocidad con la que se ejecuta el “vi”.

**Tabla 1. Requisitos mínimos de instalación para el software Labview, en Windows <sup>16</sup>**

Windows	Run-Time Engine	Entorno de Desarrollo
Procesador	Pentium III/Celeron 866 MHz o equivalente	Pentium 4/M o equivalente
RAM	256 MB	1 GB
Resolución de Pantalla	1024 x 768 píxeles	1024 x 768 píxeles
Sistema Operativo	Windows 8/7/Vista (32 bits y 64 bits) Windows XP SP3 (32 bits) Windows Server 2003 R2 (32 bits) Windows Server 2008 R2 (64 bits)	Windows 8/7/Vista (32 bits y 64 bits) Windows XP SP3 (32 bits) Windows Server 2003 R2 (32 bits) Windows Server 2008 R2 (64 bits)
Espacio en Disco	353 MB	3.67 GB (Incluye controladores predeterminados del DVD de Controladores de Dispositivos de NI)

#### 7.1.4. Comunicación serial USB (C).

Se emplea comunicación serial USB entre la DAQ y el PC debido a la alta tasa de transferencia de datos que pueden alcanzar las tarjetas de adquisición que usan dicho protocolo, además la cercanía entre el Pc y el lugar final de instalación de la DAQ que no supera los 5 metros de distancia permite la utilización de dispositivos que cuenten con este protocolo de comunicación.

#### 7.1.5. Tarjeta de adquisición de datos DAQ (D).

la tarjeta de adquisición de datos permite la discretización de señales análogas provenientes de los acelerómetros instalados en la plataforma móvil y en los modelos estructurales a escala que posteriormente son llevados al PC por medio de la comunicación serial; además recibe los bloques de datos de las señales de entrada (A) ya discretizadas que luego son reconstruidas en variables análogas usando un DAC (convertidor digital análogo) con el fin de generar una señal de control que debe ser transmitida al SmartAMP.

<sup>16</sup> Imagen tomada de <http://www.ni.com/labview/requirements/esa/>, consultado [ene 28, 2014]

La tarjeta de adquisición posee entradas análogas para la adquisición y salidas análogas para el control del equipo; este tipo de dispositivos con ambos canales se conocen como multifunción.

#### 7.1.6. Señal analógica de control (E).

Una vez los bloques de datos son enviados a la DAQ desde el Pc, estos son reconstruidos en señales análogas por medio del DAC de la tarjeta. Esta señal de control se transmite usando la conexión RSE para salidas análogas, donde la señal de salida esta referenciada a la tierra de la DAQ. Se usa un cable de tipo coaxial óptimo para evitar la incorporación de señales de ruido externas hacia la señal de control.

#### 7.1.7. SmartAMP 2100E21 (F).

El SmartAMP es un amplificador de potencia de alta calidad con una eficiencia del 92%, produce una salida con potencia suficiente para alimentar el shaker 2075e. Realimenta en tiempo real la distorsión de la señal para ejercer un mejor control sobre la potencia entregada al shaker al tiempo que protege el equipo de sobrecalentamientos o de altos niveles de corriente que puedan deteriorar el bobinado del actuador.

Posee dos terminales de entrada, uno principal en el que ingresa la señal de control proveniente de la DAQ, y un terminal auxiliar con el que se programa una alarma digital que testea los niveles de voltaje en dicho terminal y los compara con un valor predeterminado con el objetivo de detener automáticamente el equipo en caso de que sean sobrepasados los niveles de referencia.<sup>17</sup>



**Figura 22. SmartAMP 2100E21**

<sup>17</sup> The modal shop, amplificador inteligente SmartAmp  
<http://www.modalshop.com/excitation.asp?P=SmartAmp%99&ID=357> [consulta, jueves 01 de mayo del 2014]

**Tabla 2. Características eléctricas del amplificador de potencia**

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Voltaje Máximo Salida (RMS)	38v
Corriente limite (Pico)	18 <sup>a</sup>
Potencia Máxima	400w
Ganancia Max	26Db
Respuesta en frecuencia	0,4 Hz a 40Khz
Impedancia de entrada	10K $\Omega$
Impedancia de salida	30m $\Omega$

#### **7.1.8. Señal de potencia proporcionada por el SmartAMP (G).**

Es la señal de potencia con la que se alimenta finalmente el actuador y cumple los parámetros de voltaje máximo (RMS) y corriente limite (pico) mostradas en la tabla 2.

#### **7.1.9. Actuador, Shaker 2075e (H).**

básicamente el vibrador electromecánico convierte las señales eléctricas que ya han pasado por las etapas anteriores en una fuerza mecánica equivalente, con el fin de que estas fuerzas que simulan un sismo a pequeña escala se transmitan a los modelos durante las pruebas de vibración.

#### **7.1.10. Señales de aceleración (I)**

Estas señales provenientes de los acelerómetros instalados en el cabezal móvil del shaker o en los propios modelos estructurales a escala, proveen la realimentación necesaria hacia la DAQ; son discretizadas por medio del ADC (convertidor análogo digital) de la tarjeta para luego ser transmitidas seriamente al PC para un posterior análisis en Labview.

Estas señales representan la aceleración del terreno aplicada en la simulación del movimiento telúrico, o las aceleraciones provenientes de cualquier punto de la estructura que se desea estudiar durante el ensayo.

## 7.2. Requisitos para la Ni-DAQ

En el sistema que ha sido anteriormente descrito se observa la necesidad de utilizar una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) que cumpla con los siguientes parámetros.

**Tabla 3. Características necesarias para la DAQ**

PARAMETRO	CRITERIO
Multifuncionalidad	Es necesaria una DAQ multifunción, ya que se necesita generar y adquirir señales Análogas en un mismo instante de tiempo.
Salidas análogas	Se requiere como mínimo una salida analógica con la que se puedan suplir tenciones entre +10 y -10v, con dicha señal de control se excitara el actuador.
Entradas análogas	Se requieren como mínimo 4 canales de entrada análogos con los que se discretizaran 4 señales provenientes de los acelerómetros instalados en el cabezal móvil del actuador y en los modelos a escala en estudio.
Entrada digitales	Se requiere por lo menos una para implementar un botón de frenado de emergencia.
Salidas digitales	Se requiere por lo menos una para implementar el encendido y apagado de un LED testigo.
Frecuencia de muestreo	Usando el teorema de Nyquist , si se requieren discretizar cuatro señales análogas con una frecuencia máxima de 50Hz, se requiere una frecuencia de muestro mínima de $4 \cdot 10 \cdot 50\text{Hz}$ que es una taza de muestreo de 2000 S/s (muestras / segundo)
Alimentación para sensores piezoeléctricos	Los terminales de entrada deben generar una corriente de excitación constante entre 2ma y 10ma, con el fin de alimentar el circuito de pre amplificación que poseen los

	acelerómetros piezoeléctricos.
Protocolo de comunicación	Serial USB.
Tipo de alimentación	Requiere alimentación externa para poder suplir voltajes de salida entre los 10v y -10v.

### 7.3. Tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6341 de la serie X

Es la multifunción Ni-USB 6341 un dispositivo adecuado para la instrumentación de la mesa vibratoria, ya que suple las necesidades descritas en la tabla 3; esta tarjeta que pertenece a la familia de la serie x, cuenta con la nueva tecnología NI-STC3 para un máximo rendimiento en USB.



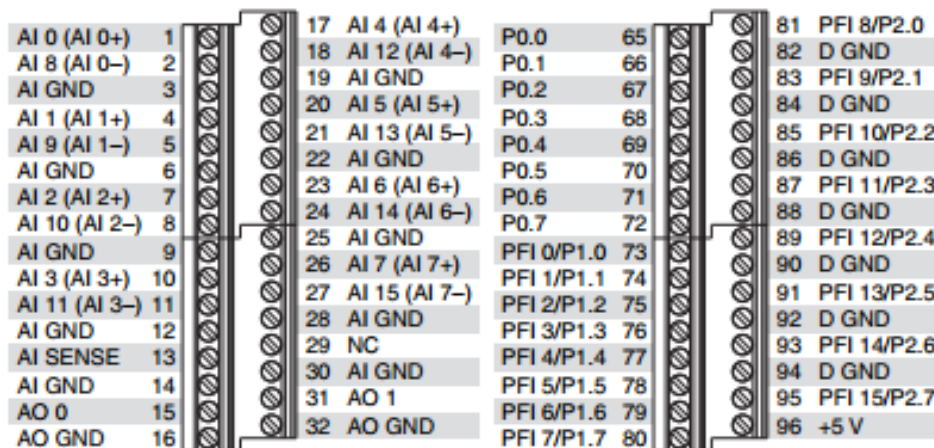
**Figura 23. Ni-USB 6341** <sup>18</sup>

Este dispositivo cuenta con varios canales de entradas y salidas análogas y digitales, un factor importante es la posibilidad de ejecutar la adquisición y generación de señales análogas de forma simultánea, así se puede ejercer control sobre el actuador y recopilar la información proveniente de los acelerómetros al mismo tiempo.

<sup>18</sup> Imagen tomada de <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/209070>, consultado [jun 22, 2014]

La DAQ 6341 cuenta con:

- 16 entradas Analógicas simples, que pueden convertirse en 8 de tipo diferencial, con una frecuencia máxima de muestro de 500k S/s (muestras/segundo)
- 2 salidas analógicas con un frecuencia máxima de muestro de 900k S/s, con una resolución de 16 bits.
- Suple valores de tensión entre +10v y -10v gracias a su fuente de alimentación externa.
- 24 líneas de E/S digital (8 temporizadas por hardware hasta 1 MHz).
- Protocolo de comunicación, serial USB.



**Figura 24. Distribución de pines DAQ 6341**

Los siguientes son los canales de interés para este proyecto, como son los canales de entrada y salida análogas y digitales.

Ao= salida análoga.

Ai= entrada análoga.

P0= entrada o salida digital

(Ai+) , (Ai-)= entrada diferencial

## 8. Instalación del actuador, Shaker 2075e

El shaker 2075e vibrador electromecánico de imán permanente de la marca Modalshop es el actuador destinado para generar los entornos de vibración controlados que se les aplican a los modelos a escala. Es importante su óptima adaptación y utilización para definir parámetros del diseño y la capacidad de carga útil, aceleraciones picos y frecuencias que se pueden alcanzar con este equipo sin que se vea perjudicado su buen funcionamiento e integridad.

El shaker 2075e puede generar fuerzas picos de hasta 75lbf si este es refrigerado con aire, o hasta 40lbf pico si no se usa refrigeración externa. Sin embargo dicha capacidad de carga se ve reducida dependiendo de las frecuencias a las que se opere el actuador, esto se muestra en la Figura 25.

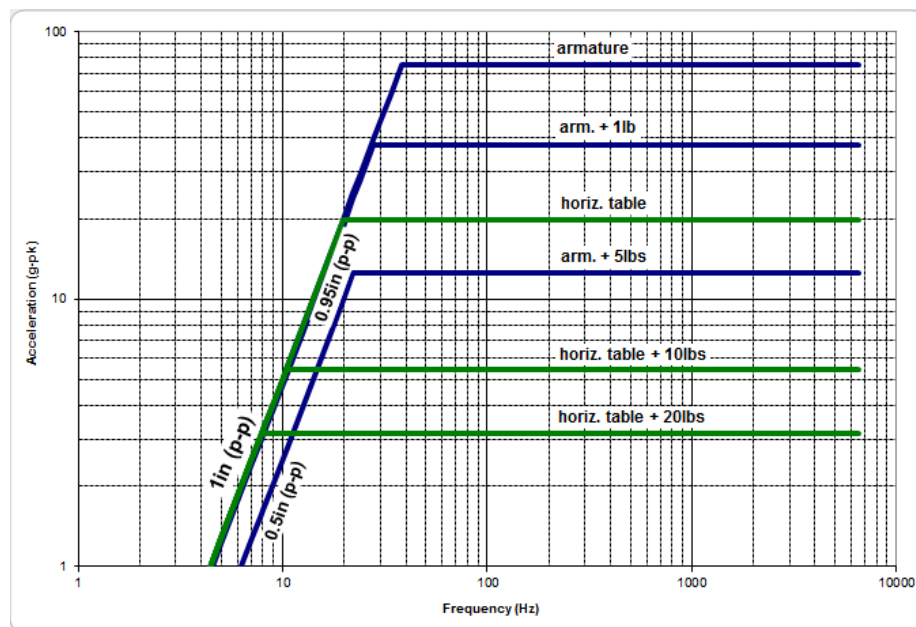
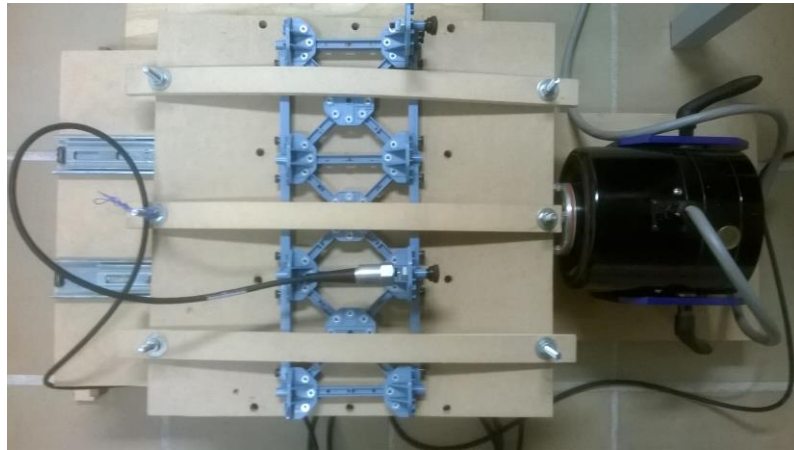


Figura 25. Curvas de carga, shaker 2075E<sup>19</sup>

De la gráfica anterior para una carga útil de 10lbs (5kg) y adicionando el peso estándar o la carga que infiere sobre el actuador la plataforma horizontal de

<sup>19</sup> Imagen tomada de [http://www.modalshop.cn/excitation.asp?P=Vibration\\_Shaker\\_Payload\\_Curves&ID=704](http://www.modalshop.cn/excitation.asp?P=Vibration_Shaker_Payload_Curves&ID=704), consultado [jun 23, 2014]

vibración, las aceleraciones máximas que puede alcanzar el cabezal móvil del shaker son cercanas a los 5g. Para los modelos a implementar en la mesa vibratoria un rango de peso entre los 5kg y 10kg es óptimo, por tanto el rango de aceleraciones en las que se debe operar el equipo para evitar recalentamientos van desde lo 5g hasta los 2g dependiendo de la masa de los modelos. La aceleración del cabezal móvil del shaker se puede regular con la amplitud de la señal de control enviada al Smartamp desde la DAQ, o desde el mismo Smartamp, girando la perilla de ganancia.



**Figura 26. Plataforma móvil y shaker 2075E (vista superior)**

El buen funcionamiento mecánico del actuador garantiza la funcionalidad del sistema en general, y marcar los límites de operación es fundamental para garantizar la robustez en general del sistema.



**Figura 27. Conexión SmartAmp – Shaker**

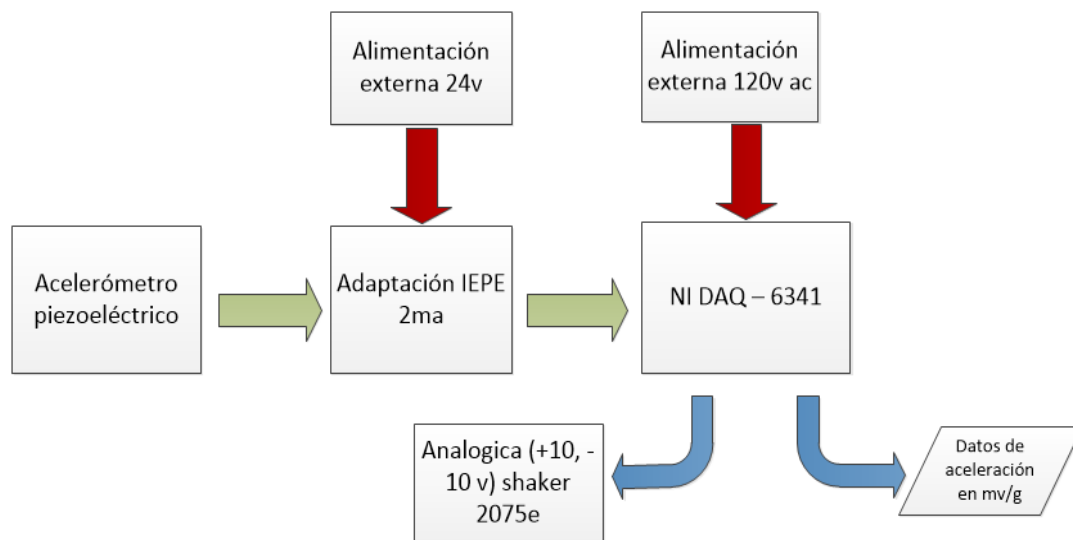
Por otra parte el Smartamp es pieza fundamental para el funcionamiento del shaker, en la Figura 27 se muestra la correcta conexión del shaker a la salida del SA y las dos entradas analógicas que posee, la principal es la señal de entrada la cual es convertida en una señal de potencia para alimentar el actuador, la otra es una señal auxiliar que permite programar alarmas de uso, esta señal puede provenir de acelerómetro, termistores etc, señales que al alcanzar el limite permisible por la alarma activan el auto apagado del SA y así protegen todos los dispositivos.<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup> Manual técnico Shaker 2075e, The modal shop, Cincinnati USA , 2010

## 9. Diseño e instalación del panel de control y adquisición de datos

El objetivo del panel de control y adquisición es contener toda la circuitería de forma ordenada en un gabinete, con el fin de proteger los dispositivos y garantizar la robustez y confiabilidad del sistema. El panel contiene la DAQ 6341 y el circuito de alimentación IEPE para la adaptación a la tarjeta de los acelerómetros piezoeléctricos, además de una fuente Dc de 24v que alimenta los circuitos periféricos a la DAQ.



**Figura 28. Diagrama esquemático del panel de control y adquisición**

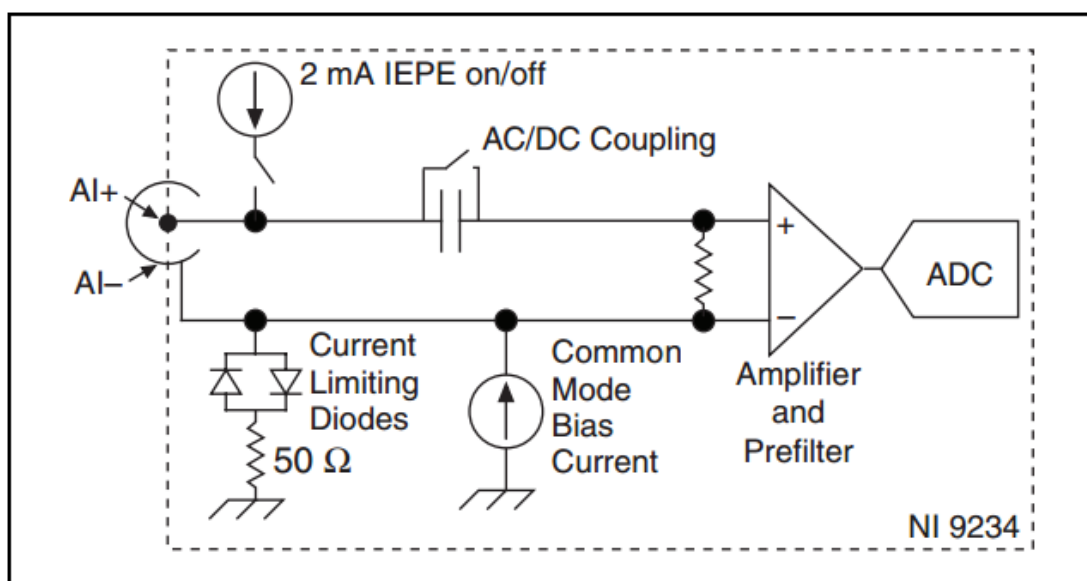
### 9.1. Diseño del circuito de alimentación IEPE para sensores piezoeléctricos.

Como se discutió en el numeral 2.3 los sensores piezoeléctricos pre amplificados necesitan de una corriente de excitación constante, que puede ir desde los 2ma hasta los 10ma según sea la especificación del fabricante; esta corriente permite que el sensor internamente aumente su sensibilidad a los movimientos mecánicos a los que es sometido.

Algunos sistemas de adquisición de datos ya incorporan este modelo de alimentación en los cuales es la misma DAQ la que proporciona la corriente de alimentación a los sensores, sin embargo el costo de estos sistemas es elevado y no ofrece los demás beneficios que entrega la multifuncional Ni-

6341 debido a que son dispositivos netamente dedicados a la adquisición de señales de este tipo de sensores, además no proveen canales de salida que permitan ejercer el control sobre el actuador; Por consiguiente es necesario diseñar un circuito de alimentación periférico que permita adaptar los sensores de aceleración piezoeléctricos a la DAQ 6341.

Para entender un poco más los parámetros del circuito a diseñar, se basó el diseño en el esquemático del circuito de alimentación IEPE que se muestra en el manual de la DAQ 9234, que es uno de los dispositivos de adquisición dedicados a este tipo de sensores que se mencionan anteriormente.



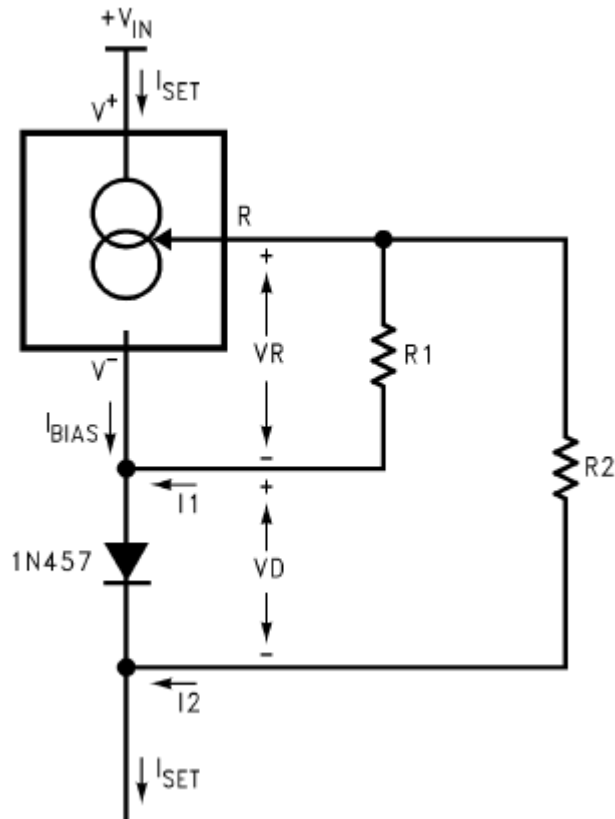
**Figura 29. Circuito de entrada para un canal NI-9234**

Del circuito de entrada para un canal de la Ni-9234 se identifica la alimentación constante de 2ma, el circuito de acople y desacople de DC, el circuito para la limitación de corriente y una referencia a tierra de 50 ohm que sirve para disminuir el ruido de tierra.<sup>21</sup>

### 9.1.1. Diseño e implementación de la fuente de corriente constante.

Lo primero en el diseño del sistema de alimentación IEPE es garantizar la corriente constante entre los terminales del sensor; para este propósito se usó el integrado LM334 (Referencia de corriente ajustable) en su configuración (Zero Tempco), que tiene como función anular la dependencia del transistor a la temperatura ambiente con el uso de un diodo de similares propiedades térmicas que el LM334.

<sup>21</sup> Manual técnico para las DAQ 9234, National Instruments, 2008



**Figura 30. Referencia de corriente (Zero Temp Co)**

Se plantean las siguientes ecuaciones para demostrar la no dependencia de la fuente de corriente al coeficiente de temperatura del integrado.

$$I_{set} = I_1 + I_2 + I_{bias}, \quad \text{Donde}$$

$$I_1 = \frac{V_R}{R_1} \quad \text{and} \quad I_2 = \frac{V_R + V_D}{R_2}$$

Como primer paso se anula el efecto del coeficiente de temperatura del transistor sobre la fuente, para esto se toma el valor de  $227\mu\text{v}/^\circ\text{c}$  como coeficiente de temperatura del lm 334, valor que es proporcionado por el datasheet y el cual ya incluye el componente de la corriente de bias. Para el diodo 1n457 recomendado en la hoja de datos del integrado, se toma un coeficiente de temperatura de  $-2.5\text{mV}/^\circ\text{c}$  que igualmente es proporcionado por el fabricante del diodo, a continuación se resuelve el sistema de

ecuaciones planteando que **La suma de variaciones de corriente causadas por la temperatura es igual a cero.**<sup>22</sup>

$$\begin{aligned}
 I_{set} &= I_1 + I_2 \\
 \frac{dI_{set}}{dt} &= \frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt} \\
 &\approx \frac{227\mu v/^{\circ}c}{R_1} = \frac{227\mu v/^{\circ}c - 2.5mv/^{\circ}c}{R_2} \\
 &= 0 \text{ (solve for tempco = 0)} \\
 \frac{R_2}{R_1} &\approx \frac{2.5mv/^{\circ}c - 227\mu v/^{\circ}c}{227\mu v/^{\circ}c} \approx 10
 \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema se obtiene que para tener una variación de la corriente  $I_{set}$  a causa de la temperatura ( $I_{set}/DT$ ) igual a cero, se necesita que  $R_2$  sea aproximadamente diez veces mayor a  $R_1$ . De esta manera se anulan entre si los efectos causados por los coeficientes de temperatura del circuito.

Ahora, conociendo la relación adecuada entre las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  se calcula una expresión para  $I_{set}$ , que es la corriente de salida del circuito y la que finalmente alimentara los acelerómetros piezoeléctricos.

$$\begin{aligned}
 I_{set} &= I_1 + I_2 + I_{Bias} \\
 &= \frac{V_R}{R_1} + \frac{V_R + V_D}{R_2} \\
 &\approx \frac{67.7mv}{R_1} + \frac{67.7mv + 0,6v}{10R_1} \\
 I_{set} &\approx \frac{0,134v}{R_1}
 \end{aligned}$$

Con la relación entre resistencias  $R_1$  y  $R_2$  y la ecuación previamente calculada para la corriente de salida, se deben calcular los valores de las resistencias para obtener una  **$I_{set} = 2ma$** .

---

<sup>22</sup> Hoja de datos para el integrado LM334, Texas Instruments, Dallas Texas USA, 2014

$$I_{set} = 2ma = \frac{0,134v}{R1}$$

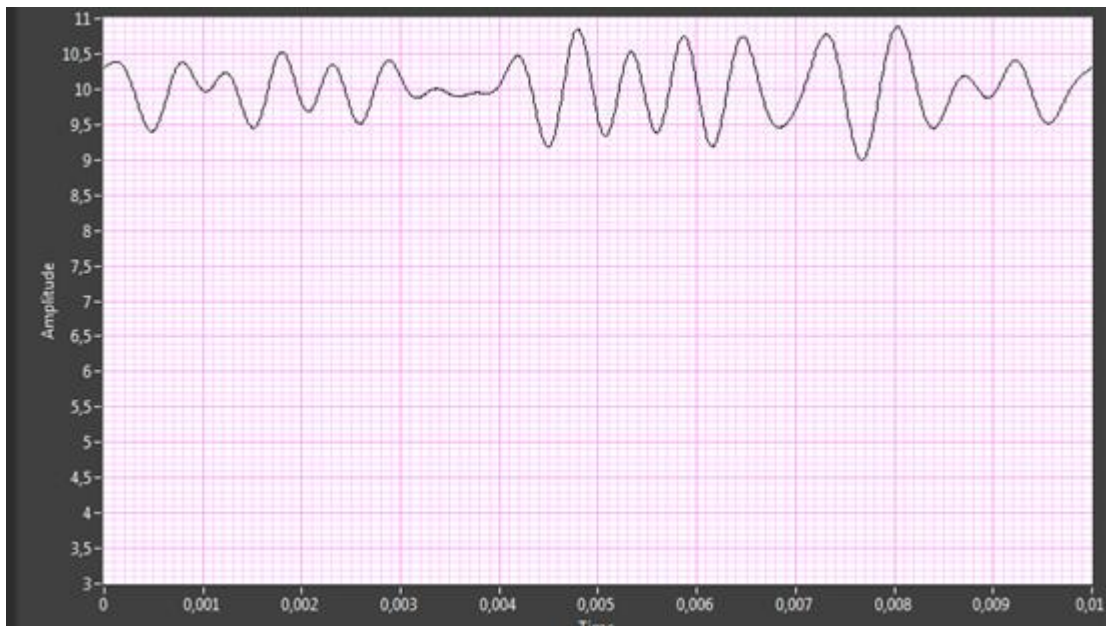
$$R1 = 67\Omega$$

$$R2 = 10 * R1$$

$$R2 = 670\Omega$$

### 9.1.2. Desacople de Dc.

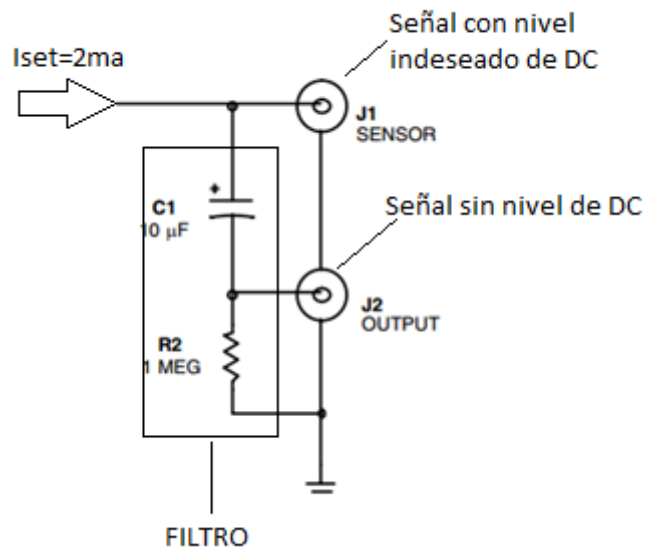
Al conectar el sensor piezoeléctrico a la fuente de corriente se genera automáticamente una tensión entre los 10v y 11v en los terminales de la fuente y el sensor como se muestra en la Figura 31, este nivel DC se genera cuando el acelerómetro se enciende y es necesario para alimentar el amplificador interno del sensor; por lo tanto toda variación de tensión que induzca el transductor estará montada sobre este nivel de DC.



**Figura 31. Señal de vibración sobre nivel de DC**

El inconveniente con estos niveles de DC, es que no aportan ninguna información sobre la medición de las vibraciones, por lo contrario la entorpecen, ya que pueden llegar a saturar el ADC y disminuyen el porcentaje de la ventana de muestreo útil del convertidor. Por esta razón es necesario desacoplar este nivel de DC antes de llevar la señal al ADC de la tarjeta de adquisición.

Un circuito de desacople de DC es un filtro pasa altas con una frecuencia de corte muy cercana a cero. La Figura 32 muestra el esquemático del circuito de desacople que se implementó; este filtro es recomendado por el fabricante del sensor para solucionar el inconveniente de los niveles de Dc, sin embargo a continuación se comprueba la funcionalidad de este para las aplicaciones desarrolladas en la mesa vibratoria.



**Figura 32. Circuito para el desacople de DC**

El anterior es un circuito pasa altos convencional por el que pasa la señal proveniente del sensor (J1) y se obtiene una señal sin niveles de DC en la salida (J2).

Para probar la funcionalidad de este circuito se construye la función de transferencia característica de dicho filtro como se ve a continuación.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R * C * S}{1 + R * C * s} \text{ (ecuación 1.)}$$

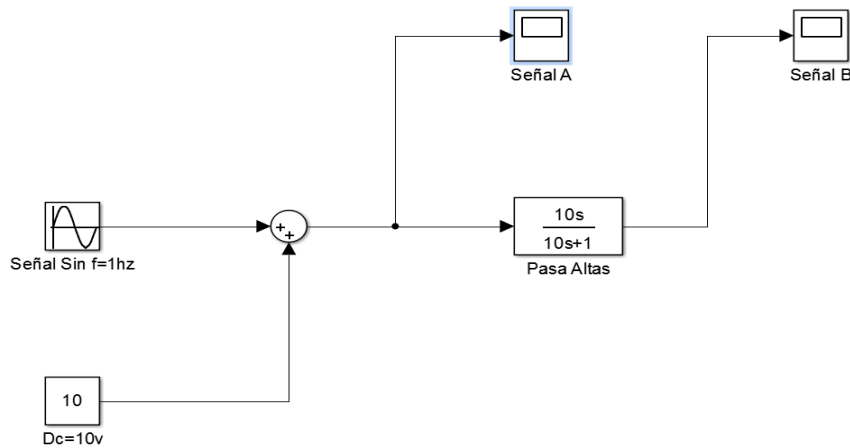
Donde R es la resistencia de 1MΩ, “C” es el condensador de 10µf y “s” es la variable de frecuencia. Remplazando se obtiene que:

$$G(s) = \frac{10 * S}{1 + 10 * S} \text{ (ecuación 2.)}$$

Para la cual la frecuencia de corte está dada por la expresión

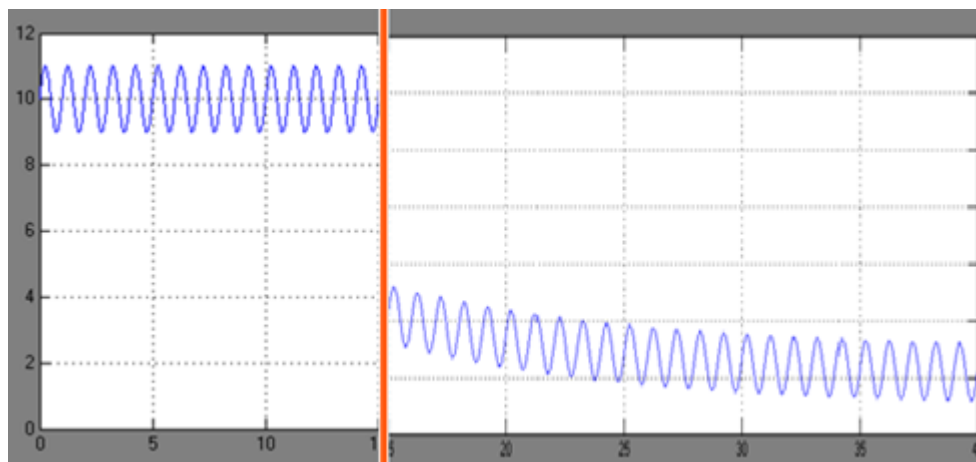
$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * R * C} = 0.016\text{Hz (ecuacion 3.)}$$

A continuación se verifica la funcionalidad del filtro simulando la ecuación 2 en el entorno de programación SIMULINK de Matlab.



**Figura 33. Diagrama de bloques filtro pasa altas.**

En la simulación anterior se monta una señal sinusoidal con una frecuencia de 1Hz sobre un valor constante de 10v; el visualizador con el nombre (señal A) muestra la señal resultante de la suma de estas dos entradas.



**Figura 34. Simulación Filtro pasa altas**

Esta señal se transmite al bloque matemático que representa al filtro pasa altas, con el fin de que este elimine el nivel de Dc de la entrada y así solo se

obtenga la señal sinusoidal que transmite la información proveniente de los sensores de vibración. Esta señal se muestra en el visualizador Señal B.

El visualizador señal B muestra como es eliminado el nivel de Dc de la señal de entrada haciendo, que después de 30 segundos de haberse conectado el filtro se eliminen casi por completo los niveles de tensión no deseados y vaya quedando solo la señal sinusoidal de 1Hz sin que esta se reduzca en amplitud; esto prueba que la frecuencia de corte está muy por debajo de la frecuencia de 1Hz y que las señales provenientes de los acelerómetros no se verán afectadas al atravesar el filtro.

### 9.1.3. Implementación de la PCB para el circuito de alimentación IEPE.

Habiendo diseñado la etapa de alimentación de corriente constante y el circuito de desacople de DC se procede a implementar el circuito de alimentación IEPE para los sensores piezoeléctricos. El diseño de la placa base fue realizado en el Software Eagle Layout como se observa en la Figura 35.

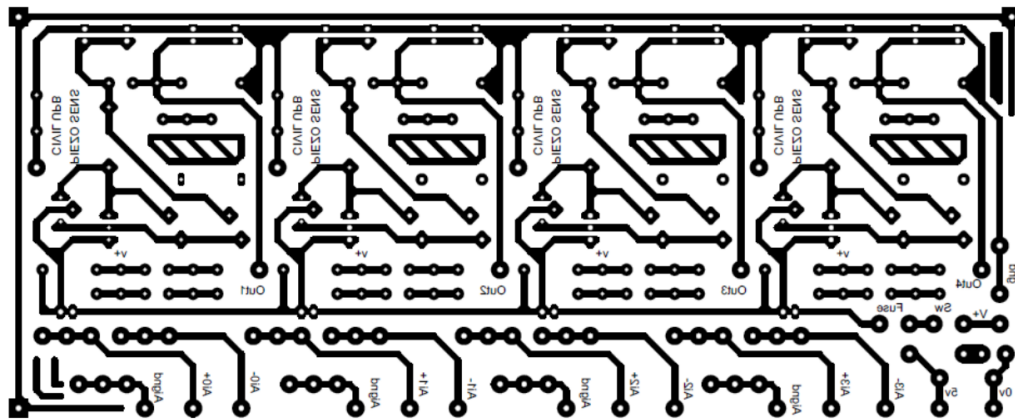


Figura 35. Placa base

La placa base contiene el circuito de adaptación IEPE para 4 sensores piezoeléctricos y la conexión para 4 entradas análogas diferenciales provenientes de la DAQ 6341. Además de 2 entradas de alimentación, una a 24V y otra de 0V a 5V. Por ultimo una protección por fusible de 500mA.

- **Out1, Out2, Out3, Out4:** Puntos de salida para las señales provenientes de los sensores piezoeléctricos.
- **5v, 0v:** Alimentación de tensión constante suplementada por la DAQ 6341.

- **V+**: Alimentación de tensión constante a 24v proveniente de una fuente de voltaje externa.
- **Gnd**: Referencia del circuito proveniente de la fuente de voltaje externo.
- **(Ai 0+, Ai 0-) ( Ai 1+, Ai 1-) (Ai 2+, Ai 2-) (Ai 3+, Ai 3-)** : Pares de entradas diferenciales para la DAQ 6341.
- **AiGnd**: Referencia para las entradas análogas de la DAQ 6341.
- **Fuse**: Puente para la conexión de un fusible de 500ma.
- **Sw**: Puente para la conexión de un interruptor.

## 9.2. Diseño de la carcasa en acrílico para la placa base.

La placa base que contiene los circuitos de alimentación IEPE para los sensores piezoeléctricos necesita ser de fácil acceso para el usuario del módulo de vibraciones, y es necesaria la fabricación de una carcasa rígida que soporte los conectores BNC que permiten la adaptación de los sensores a la placa base, y de varios pares de borneras para que al usuario pueda realizar distintas conexiones entre las señales de salida y las entradas análogas a la tarjeta de adquisición de datos.

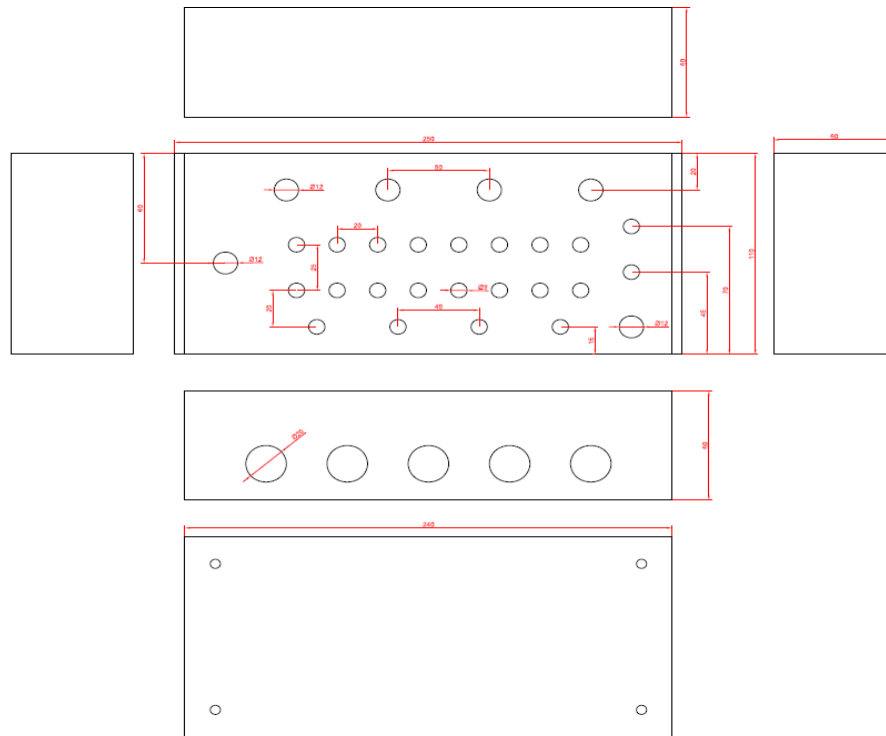
Para la implementación de 4 sensores de aceleración y una señal de salida analógica para la excitación del shaker se hace necesaria la adaptación de los siguientes conectores.

4 conectores BNC hembra para 4 sensores piezoeléctricos.

1 conector BNC para la señal de control al shaker.

22 borneras clásicas para las conexiones provenientes de la DAQ 6341 y las salidas de los señores de aceleración.

1 portador de fusibles.

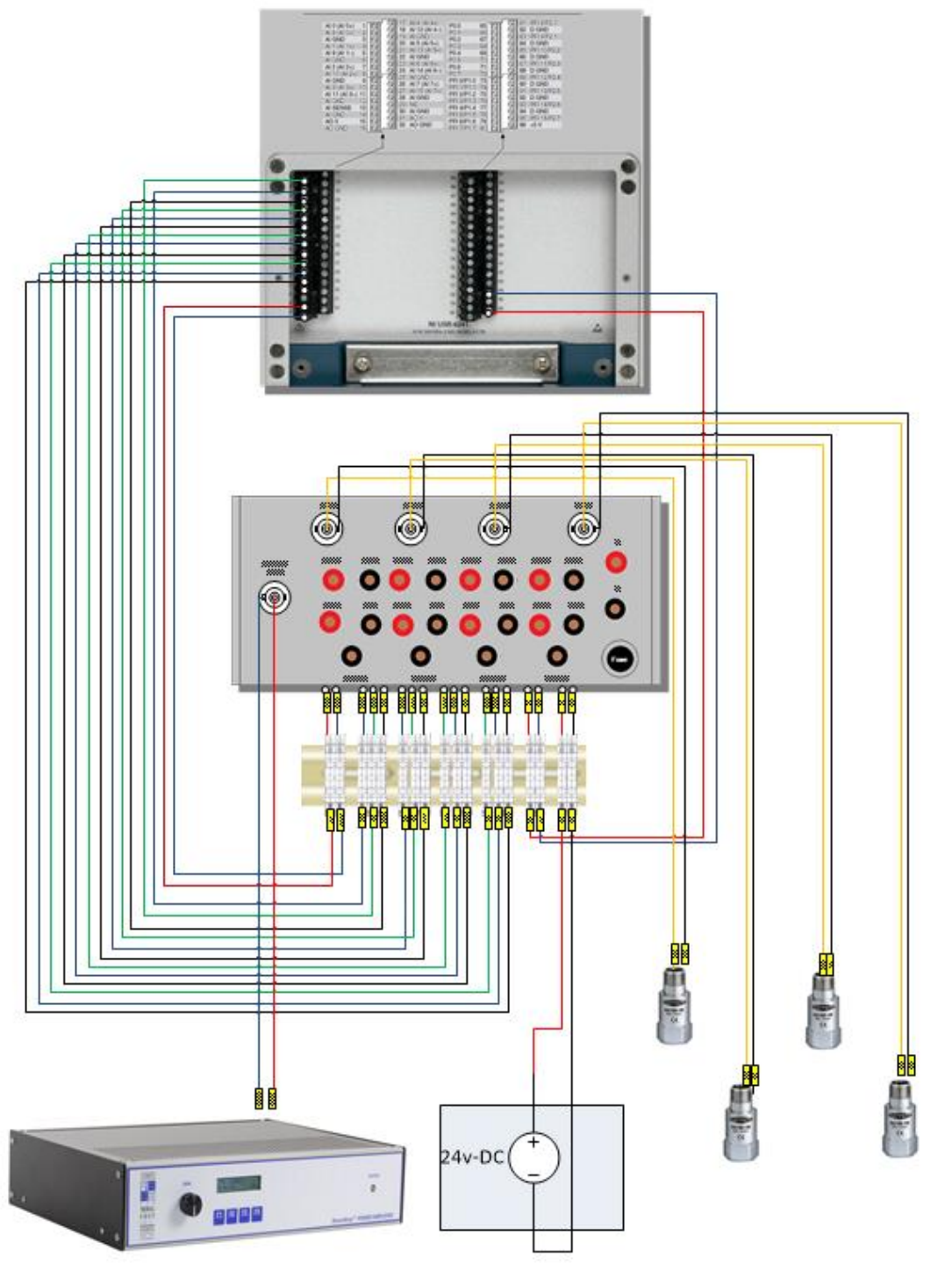


**Figura 36.** Diseño carcaza para placa base.

### 9.3. Esquemático final del panel de control y adquisición.

La Figura 37 muestra el plano con las conexiones finales necesarias para la instalación del módulo de adquisición y control, para ver con más detalle se puede acudir al ( Anexo D); las conexiones entre la tarjeta de adquisición y la placa base para la alimentación IEPE se realizaron con cable fibrilar calibre 20, mientras que las conexiones entre los sensores y la placa base se hacen por medio de cable coaxial al igual que la conexión entre la salida análoga de la DAQ y el smartAmp.

La fuente de 24v DC alimenta el sistema de alimentación IEPE mientras la DAQ recibe energía de un adaptador de alimentación propio entregado por el fabricante.



**Figura 37. Esquemático panel de control y adquisición**



**Figura 38. Panel de control y adquisición implementado.**



**Figura 39. Panel de control y adquisición, Cableado**

## **10. Software implementado en Labview para el módulo de vibraciones**

Parte fundamental de la implementación del módulo de vibraciones es el desarrollo de los instrumentos virtuales que permitan al usuario interactuar de forma fácil con los equipos y llevar a cabo de manera práctica las pruebas y ensayos que este desee realizar sobre los modelos estructurales a escala. Para el desarrollo de estos “Vi” se debe empezar conociendo las necesidades del software que van desde la adquisición de datos, hasta la reconstrucción de acelerogramas importados desde Excel.

### **10.1. Necesidades del software y aplicaciones para el análisis dinámico estructural.**

Adquisición de datos: como se ha mencionado anteriormente el módulo de vibraciones cuenta con 4 entradas análogas provenientes de 4 sensores de aceleración piezoeléctricos. Estos sensores captan señales con frecuencias entre 1hz hasta los 100 hz según el ensayo realizado y el modelo en estudio. La toma de datos debe hacerse de forma continua durante los ensayos y en ocasiones de forma simultanea entre pares de sensores.

Generación de señales de control: el SmartAmp del shaker requiere de una señal análoga entre los -10v y 10 v que pueden variar en frecuencia desde los 0hz hasta los 100 hz.

Control (Realimentación): para algunas aplicaciones como la prueba de resonancia es de importancia garantizar la amplitud constante de las excitaciones aplicadas por el equipo, por lo tanto es necesario realimentar las aceleraciones provenientes del cabezal móvil del shaker para poder controlar la amplitud de los desplazamientos del mismo.

Aplicación para simulación de sismo ideal (movimiento forzado amortiguado): se debe implementar un generador de armónicos que varíen entre 1 hz y 100hz.

Aplicación para simulación de sismo real (movimiento forzado amortiguado): se debe implementar un instrumento virtual, que importe fragmentos de acelerogramas reales para que estos sean reconstruidos en señales análogas de control, de esta manera se puede simular cualquier entorno de movimiento controlado y no enfocarse únicamente en el estudio de la respuesta de los modelos ante excitaciones armónicas.

Aplicación para prueba de resonancia: se basa en la implementación de un generador de armónicos que varíe gradualmente la frecuencia entre 0hz y 50 hz que a su vez garantice desplazamiento constante en el cabezal móvil del shaker; estos con el fin de generar graficas de T(periodo) versus X(desplazamiento).

Aplicación para ensayo libre amortiguado: se basa en la adquisición de señales de vibración y la interpretación de estas para determinar el periodo natural de los modelos y la variable amortiguamiento del sistema.

Filtros digitales: se deben implementar filtros rechaza banda para la frecuencia de 60Hz de la red eléctrica y la frecuencia de resonancia del acelerómetro piezoeléctrico, de esta manera mejorar la calidad de los datos adquiridos.

Análisis de Fourier: basándose en el análisis de señales de entrada según su descomposición en armónicos, de esta manera se puede realizar una mejor interpretación de las variables de vibración.

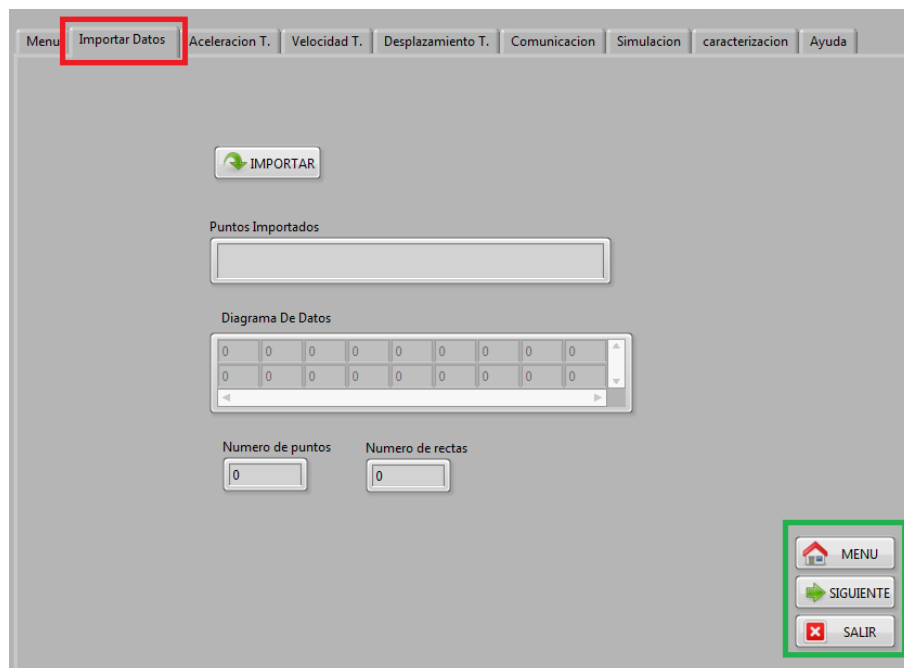
## 10.2. Vista general del software implementado en Labview para el módulo de vibraciones.



Figura 40. Menú principal.

el menú principal de la aplicación implementada en labview para el módulo de vibración cuenta con los botones de acceso a 9 sub menús, donde se ejecutan diferentes tareas como la importación de datos y la reconstrucción de variables de velocidad y desplazamiento entre otras; con el objetivo de realizar una aplicación ordenada, clara y de fácil operación se construyó el software con una estructura de máquinas de estado que permite al usuario desplazarse de forma fácil entre diferentes sub menús para realizar distintas tareas.

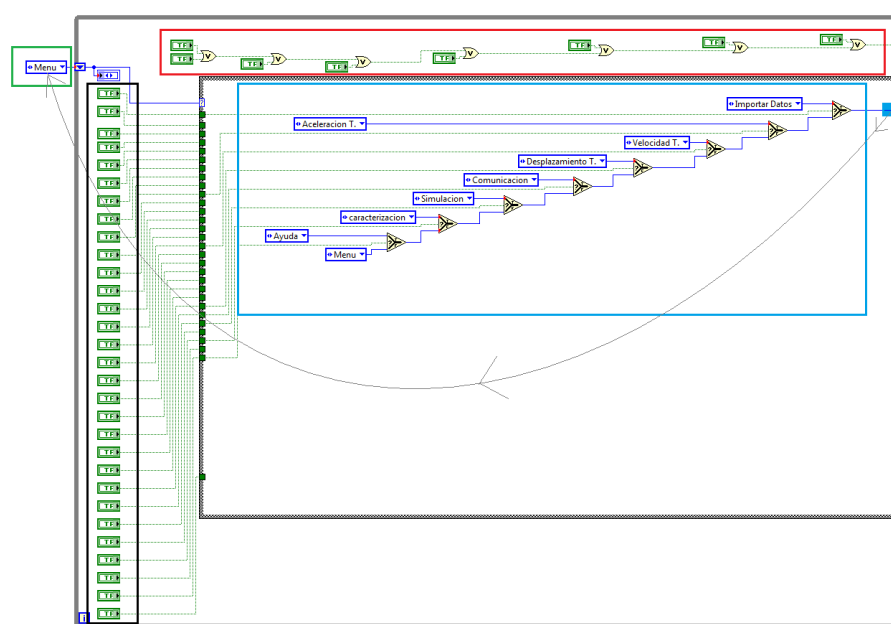
Por ejemplo al hacer clic en la pestaña importar datos, el menú despliega la sub ventana importar datos como se muestra en la Figura 41.



**Figura 41. Sub menú importar datos.**

Después de haberse desplegado el sub menú importar datos el indicador de estados saltara de (menú) a (importar datos) como se observa en el recuadro del color rojo; ahora dentro de la sub ventana de importación de datos aparecerán los comandos y visualizadores propios del sub menú además de otros 3 botones de navegación que se ven en el recuadro verde; el botón menú lleva al usuario directamente a la ventana del menú principal mientras que el botón siguiente despliega el sub menú adyacente, que para este caso sería (Aceleración T.). Todo lo anterior ocurre de igual forma en cualquiera de los otros sub menús facilitando y agilizando el uso del módulo de vibraciones y sus aplicativos.

Dando una vista más profunda al funcionamiento del menú y la máquina de estados que lo conforma, se observa una estructura case dentro un bucle while; el bucle while se encarga de que el código se ejecute repetitivamente hasta que cualquiera de las variable booleanas encerradas en el recuadro rojo marquen un alto, estas variable enlazadas por compuertas OR pertenecen a los botones salir instalados en el panel frontal del programa. Por su parte la estructura case contiene cada uno de los códigos pertenecientes a los sub menús del programa y el cambio de panel de programación en la estructura case es la que permite la fácil navegación entre los diferentes instrumentos virtuales embebidos en el programa. La estructura case es controlada por el indicador de estados encerrado en el recuadro verde; que este se encuentre mostrando la palabra “menú” indica que el panel frontal se encuentra en la ventana menú principal. El indicador de estados es conmutado por una cascada de condicionales que dependiendo del estado de los interruptores encerrados en el recuadro negro, llevaran el estado indicado a la variable indicador de estados; estos interruptores son los diferentes botones de navegación desplegado por todo el panel frontal del programa.



**Figura 42. Panel de programación del menú principal.**

### 10.3. Sub menús e instrumentos virtuales

A continuación se describen cada uno de los sub menús instalados en el programa su funcionamiento y programación.

#### 10.3.1. Sub menú “importar datos”.

Importar datos permite al usuario traer desde Excel o bloc de notas a labview, pares de datos de aceleración y tiempo, pertenecientes a acelerogramas.

Para importar datos basta con dar clic en el botón importar, automáticamente se desplegara un buscador de archivos de Windows y basta solo con seleccionar el archivo que se desee importar como se muestra en la Figura 44.

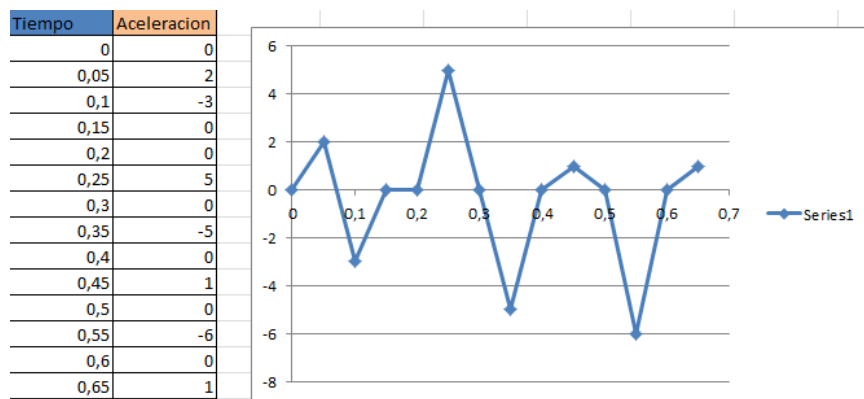
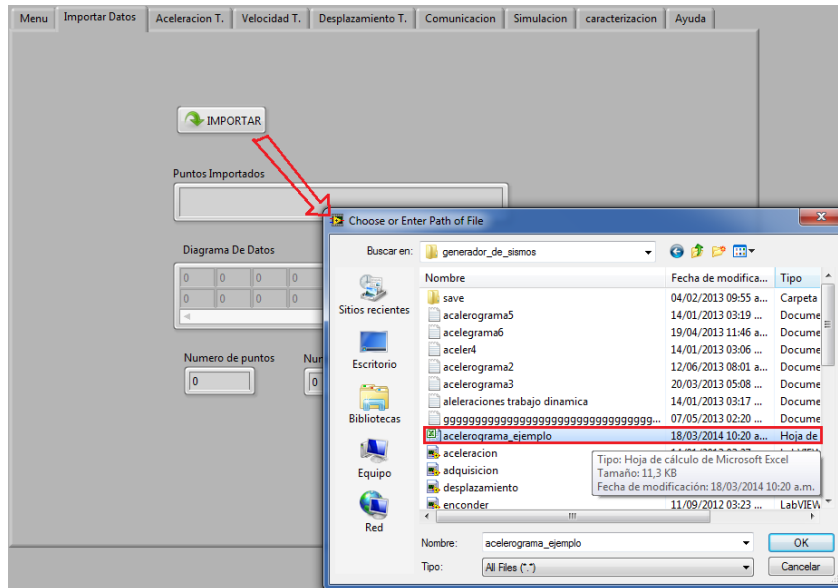


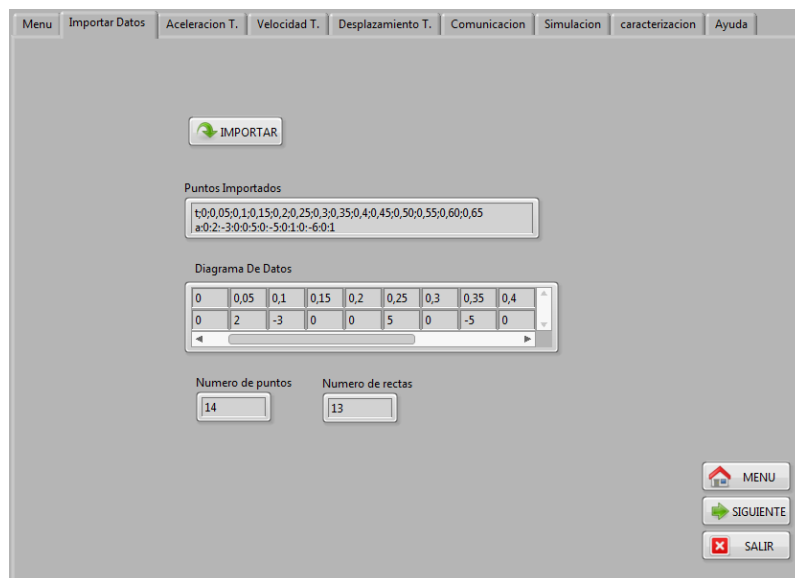
Figura 43. Acelerograma en Excel

Para explicar el funcionamiento de la mayoría de los sub menús se usara el acelerograma de la Figura 43, el cual contiene 14 pares de datos de tiempo y aceleración.



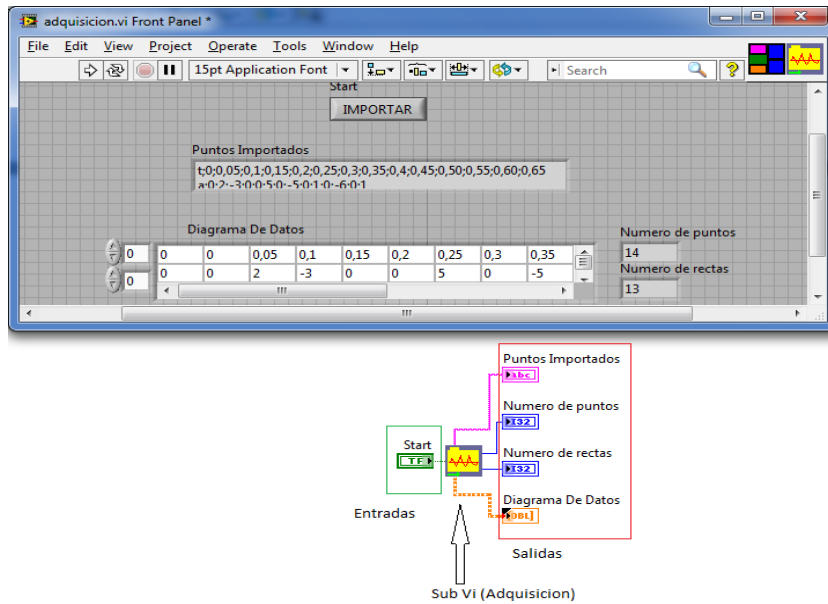
**Figura 44. Selección de Acelerograma.**

Una vez importado el archivo de Excel a Labview, los datos importados aparecerán emparejados en la tabla diagrama de datos y puntos importados que se encuentran en el sub menú importar datos; además se mostrarán dos indicadores, uno con el número de puntos importados y otro con las secciones interpoladas entre estos o rectas que conforman el acelerograma.



**Figura 45. Datos importados a Labview.**

Para programar el sub menú importar datos se desarrolló un “Sub Vi” que no es más que un sub programa embebido en el programa principal como se observa en la Figura 46, esto se hace para mantener el código del programa principal compacto y ordenado.

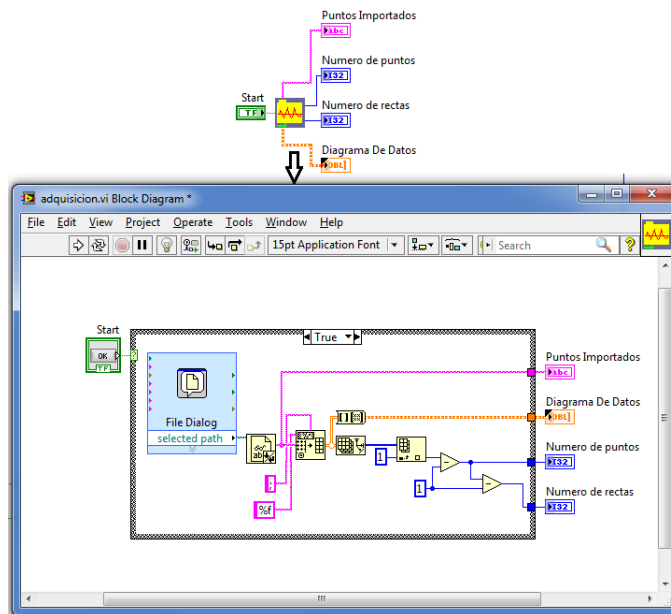


**Figura 46. Sub Vi “importar datos”**

La imagen anterior fue tomada del código perteneciente al programa principal, y solo se observa el sub vi con una única entrada booleana que pertenece al pulsador “importar” el cual se aprecia en la figura 30, además de las salidas ya mencionadas como puntos importados, número de puntos, numero de rectas y diagrama de datos.

Como el sub vi es un subprograma, ligado a este abra una sub programación que se obtiene al pulsar sobre el icono del sub vi correspondiente.

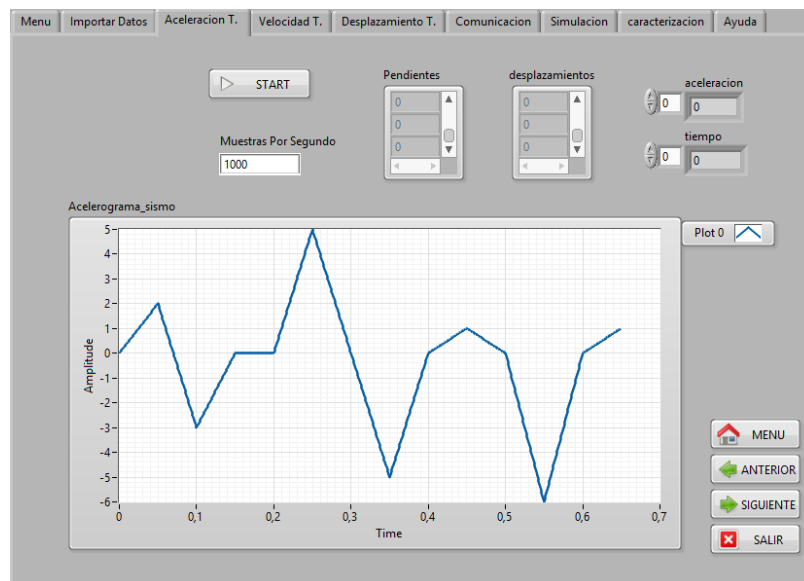
En una descripción general del sub programa, cuando la variable “start” se pone en verdadero se ejecuta el código dentro de la estructura case. Primero despliega la ventana de dialogo para buscar el archivo que se precisa, una vez escogida la dirección del archivo el bloque lectura de archivo importa los datos a labview donde se organizan en forma de una matriz de 2xN, donde N depende del número de puntos que contiene el acelerograma. Esta matriz contiene en la primera fila los valores de tiempo y en la segunda fila los valores de aceleración que se han importado.



**Figura 47. Panel de programación Sub Vi “importar datos”**

### 10.3.2. Sub menú “aceleración T”.

Aceleración del terreno (Aceleración T), reconstruye el acelerograma a partir de la matriz 2xN de datos de tiempo y aceleraciones que se obtuvo del sub menú importar datos.



**Figura 48. Panel frontal “Aceleración T”**

El sub menú “aceleración del terreno” realiza interpolaciones rectas entre todos los puntos del acelerograma, con el fin de reconstruir una onda continua propia de la señal de entrada, en este punto se puede comparar la gráfica en Excel del acelerograma de la Figura 43, Con la señal reconstruida en Labview del mismo acelerograma en la Figura 48.

Como datos de entrada para este menú están la matriz de 2xN datos provenientes del menú importar datos y el valor de muestras por segundo con el que se desea reconstruir la señal, también se puede entender como el número de puntos o datos en un segundo con el que el aplicativo reconstruirá la nueva señal.

En forma de ejemplo para el acelerograma actual que tiene una duración de **0,65 segundos** y se ha definido un valor de **1000 muestras por segundo**, la señal de aceleración del terreno reconstruida tendrá **(0,65 \* 1000) 650 pares de datos de tiempo y aceleración**.

De esta manera la nueva matriz de datos para el acelerograma ejemplo tendrá una dimensión de 2x650 datos. La matriz de datos que generara el “Vi” para cualquier otro acelerograma está dada por la siguiente ecuación.

#### **Ecuación para la dimensión de la matriz de aceleración**

$$M(a) [2 \times (t \cdot K)]$$

M = Matriz de datos de tiempo y aceleraciones del terreno.

t = Duración total del acelerograma.

K = Numero de muestras por segundo.

Además de la matriz de aceleración y la gráfica (t vs a) de la misma, el sub menú Aceleración del terreno muestra los componentes de la ecuación lineal de cada uno de los segmentos de recta que conforma el acelerograma; para cada segmento existe un valor de pendiente y un desplazamiento de la recta respecto al origen.

De esta manera el acelerograma reconstruido queda representado en función de cada una de las ecuaciones características de los segmentos de línea que lo conforman.

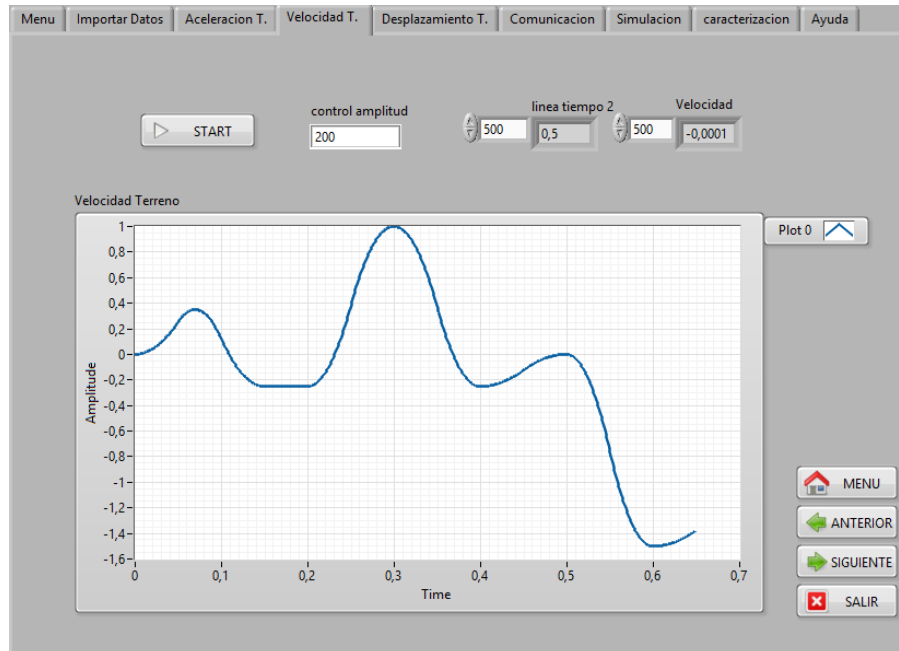
**Tabla 4. Interpolación del acelerograma ejemplo**

t	a	m	b	a=mt+b	intervalo
0	0				
		40	0	a=40t	$0 \leq t \leq 0,05$
0,05	2				
		-100	7	a=-100t+7	$0,05 < t \leq 0,1$
0,1	-3				
		60	-9	a=60t-9	$0,1 < t \leq 0,15$
0,15	0				
		0	0	a=0	$0,15 < t \leq 0,2$
0,2	0				
		100	-20	a=100t-20	$0,2 < t \leq 0,25$
0,25	5				
		-100	30	a=-100t+30	$0,25 < t \leq 0,3$
0,3	0				
		-100	30	a=-100t+30	$0,3 < t \leq 0,35$
0,35	-5				
		100	-40	a=100t-40	$0,35 < t \leq 0,4$
0,4	0				
		20	-8	a=20t-8	$0,4 < t \leq 0,45$
0,45	1				
		-20	10	a=-20t+10	$0,45 < t \leq 0,5$
0,5	0				
		-120	60	a=-120t+60	$0,5 < t \leq 0,55$
0,55	-6				
		120	-72	a=120t-72	$0,55 < t \leq 0,6$
0,6	0				
		20	-12	a=20t-12	$0,6 < t < 0,65$
0,65	1				

La Tabla 4 muestra cada uno de los parámetros para los segmentos de recta que conforman el acelerograma ejemplo.

### 10.3.3. Sub menú “velocidad T”

El sub menú velocidad del terreno toma la matriz de aceleración M(a) construida en el menú anterior y la integra numéricamente, para generar una matriz de velocidades.

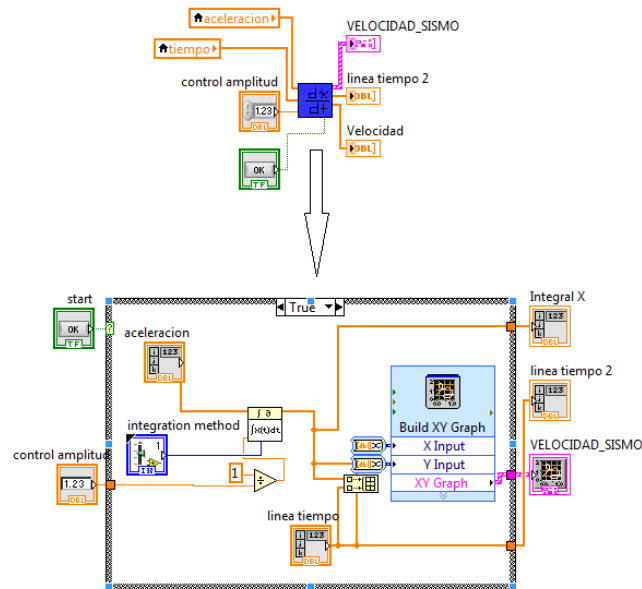


**Figura 49. Panel frontal “Velocidad T”.**

La Figura 49 muestra el diagrama de velocidades resultante de integrar el acelerograma ejemplo. Como método de integración se usa la regla del trapecio, la cual resulta más idónea debido a que la matriz de aceleraciones se construyó interpolando polinomios de grado 1 (rectas) entre los puntos del acelerograma importado.

Al igual que en los sub menú anteriores se ha implemento un sub “vi”,  $dx/dt$  hace referencia al bloque de programación que tiene como función encontrar la matriz de velocidades del acelerograma. Este bloque posee las entradas Aceleración y tiempo, que conforman la matriz de aceleraciones provenientes del menú anterior además de la entrada numérica control de amplitud la cual define el ancho de la sección “dt” para la integración numérica.

Como salidas del bloque se obtienen los vectores velocidad y línea de tiempo que contienen los valores de velocidad del terreno.



**Figura 50. Panel de programación sub menú “velocidad T”.**

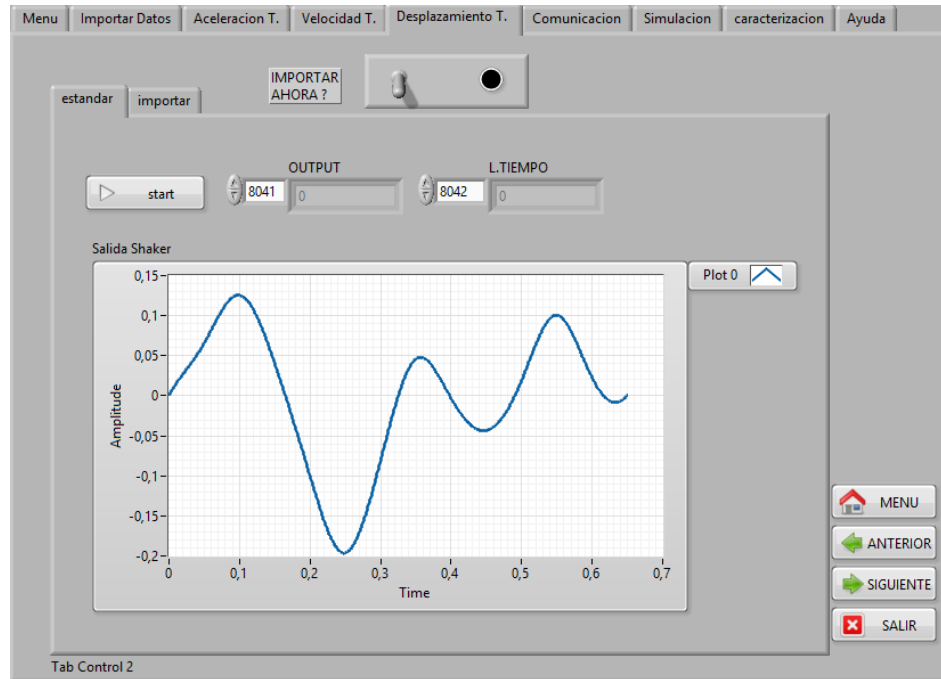
#### **10.3.4. Sub menú “Desplazamiento T”**

Al igual que el menú anterior, Este tiene como objetivo realizar la integración numérica de la matriz de velocidades para obtener el desplazamiento del terreno, que al final representan los movimientos controlados que se desean reproducir con el shaker 2075e.

El vector de desplazamientos obtenido después es convertido en una señal eléctrica de tensión que es transmitida al amplificador de potencia a través de la DAQ 6341.

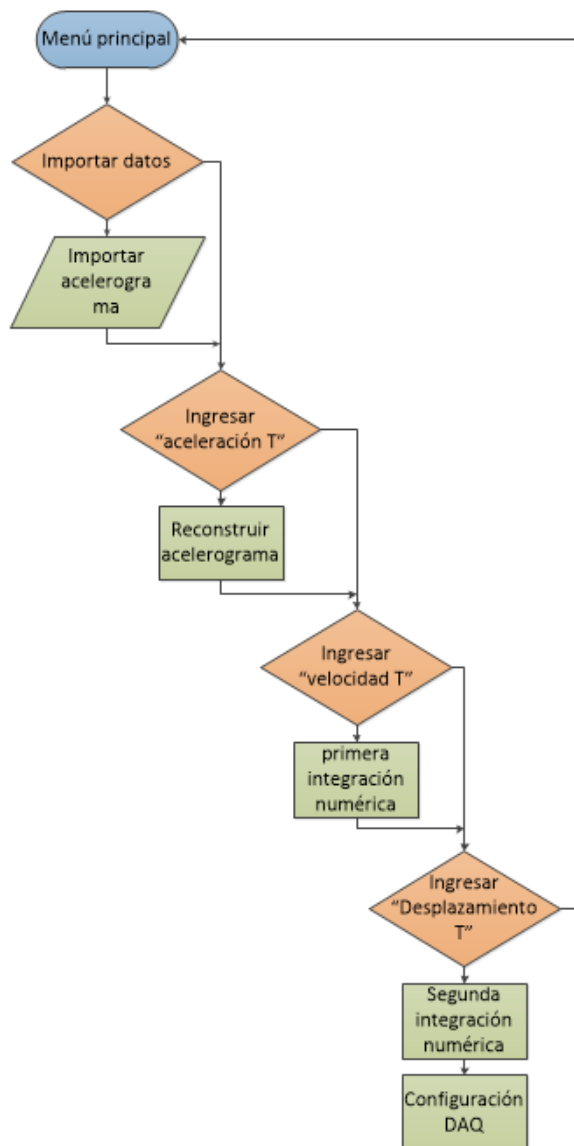
En la Figura 51 se observan los datos de desplazamiento del terreno que resulta de realizar la segunda integración a los datos de aceleración importados del ejemplo 1. Además el programa ha anexado una rampa decreciente en el segundo 0.64 donde termina la simulación y el segundo 0.8, esto con el fin de evitar cambios bruscos de posición en el cabezal móvil del shaker, justo después de haber terminado la simulación, y así garantizar una transición más lenta a la posición de origen.

Por otra parte la opción importar ahora; permite importar directamente archivos de Excel que ya contengan datos de desplazamientos del terreno del sismo que se desee simular.



**Figura 51. Panel frontal “Desplazamiento T”.**

Una vez reconstruida la onda del acelerograma y haber encontrado la señal que describe el desplazamiento del terreno, la señal está casi lista para ser transmitida al amplificador de potencia; a esta señal solo falta realizársele un procesamiento matemático a el que se le conoce como **corrección de línea base**; donde se busca garantizar la coherencia de los valores de los desplazamientos obtenidos después de la digitalización de la señal y la integración numérica que se le ha realizado, este proceso se describirá minuciosamente más adelante. En el diagrama de flujo de la Figura 52 se realiza una síntesis de lo que el software para del módulo de vibraciones ha realizado hasta ahora respecto a la importación de los datos, y la reconstrucción de las ondas de aceleración, velocidad y desplazamiento.



**Figura 52. Diagrama de flujo para la reconstrucción de registro de desplazamientos.**

Hasta ahora se ha logrado crear un registro digital de los acelerogramas en Labview, importando los puntos del acelerograma desde Excel, interpolando polinomios de primer grado entre dichos puntos y por ultimo integrando numéricamente 2 veces consecutivas para encontrar el registro de velocidades y desplazamiento del sismo.

## 10.4. Corrección de línea Base.

Existen ciertas técnicas numéricas usadas para mejorar los datos obtenidos de los acelerógrafos o acelerómetros con el objetivo de garantizar una mejor coherencia en los valores allí depositados.

La corrección de línea base es un mecanismo que se usa para eliminar el error de posición y velocidad final, que se obtiene después de integrar una variable de aceleración buscando inferir de esta las magnitudes físicas de velocidad y desplazamiento.

Este problema ocurre por una razón principal; los acelerómetros y acelerógrafos no son dispositivos 100% exactos, aunque bien instalados y calibrados pueden arrojar datos muy certeros el hecho de discretizar una variable física ya añade un grado de incertidumbre dependiendo de la resolución y la calidad del instrumento. Normalmente entre los puntos de un acelerograma se interpolan polinomios de 1er o 2do grado para tratar de reconstruir la variable, sin embargo esta suposición genera un error un tanto insignificante entre pares de puntos pero que al ser integrados numéricamente son concatenados y normalmente pueden llegar a generar un error significativo en los valores finales de las variables inferidas mediante la integración.

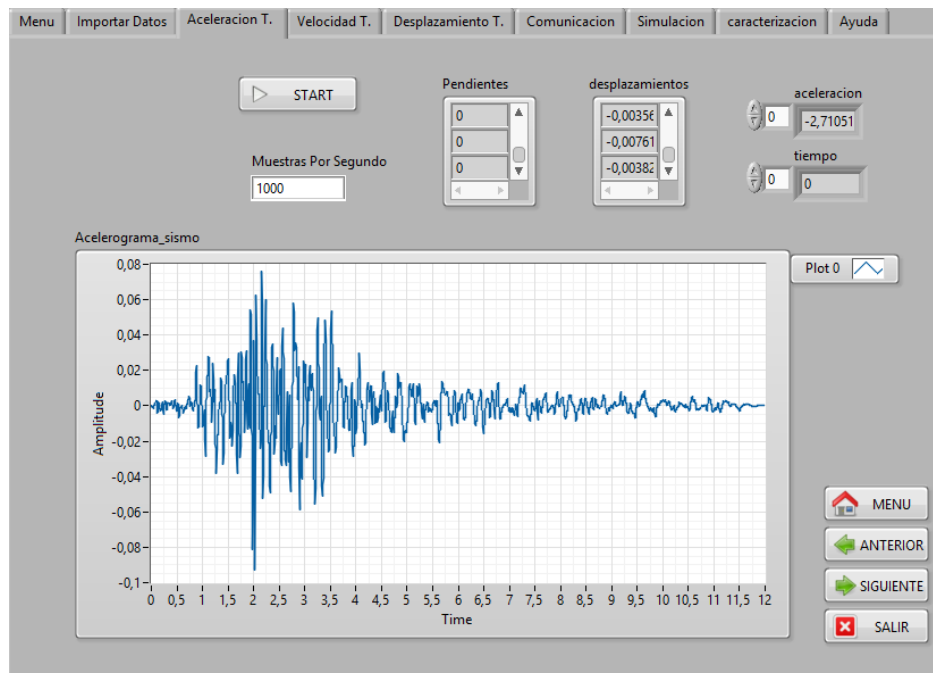
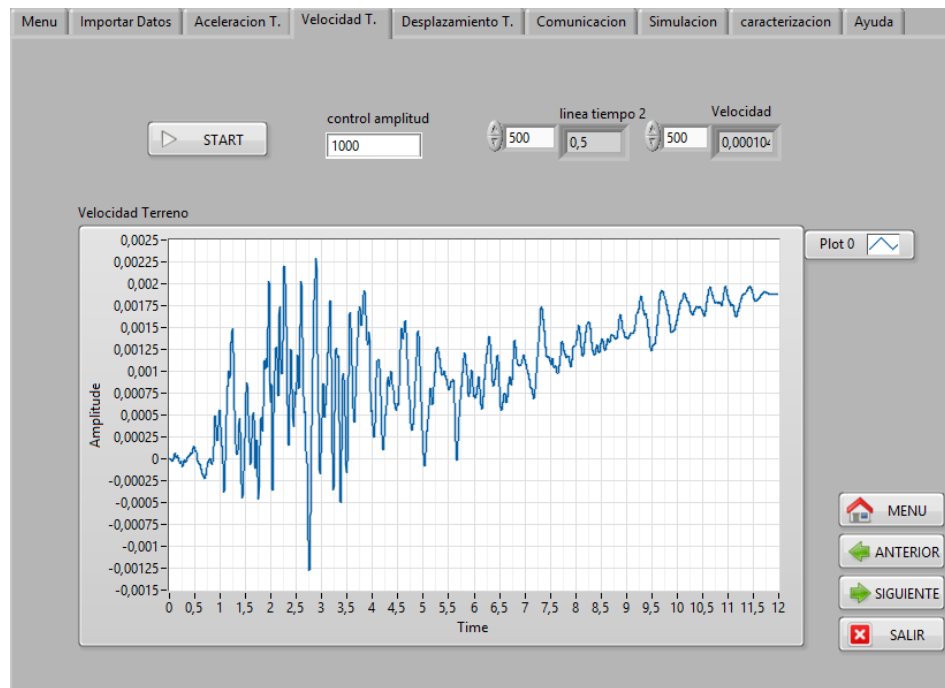


Figura 53. Acelerograma de Northhidge, Importado.

En la Figura 53 se muestra el acelerograma del sismo de Northridge importado al software de control; a continuación se buscarán inferir los registros de velocidad del sismo, realizando la primera integración numérica sobre el registro ya importado.

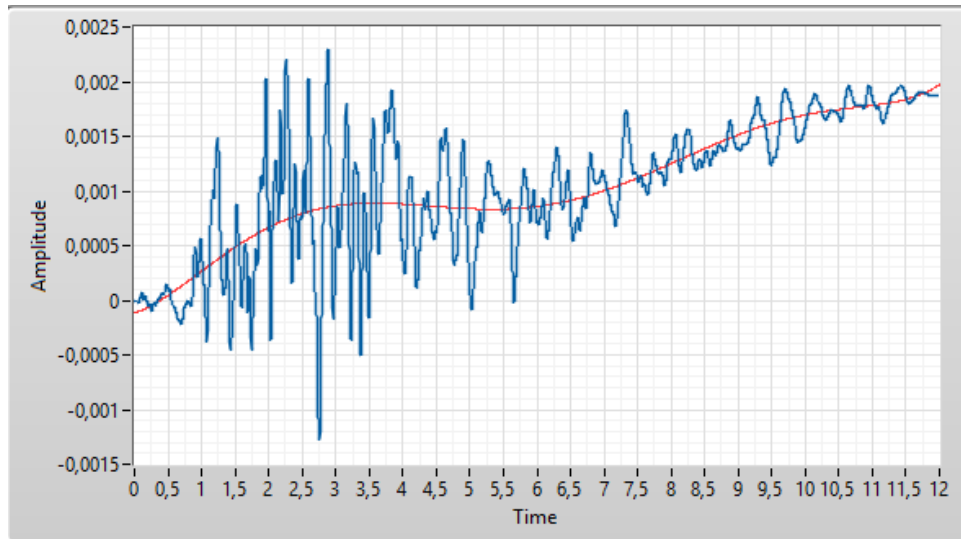


**Figura 54. Velocidades de Northridge no corregidas**

Como es de esperarse al integrar el acelerograma se obtuvo un registro de velocidades con un error de valor final ya que al no concordar dicho valor con el origen, se deduciría que el suelo aún sigue desplazándose hacia cierta dirección con una velocidad aproximada de 0.2m/seg después de terminado el movimiento telúrico.

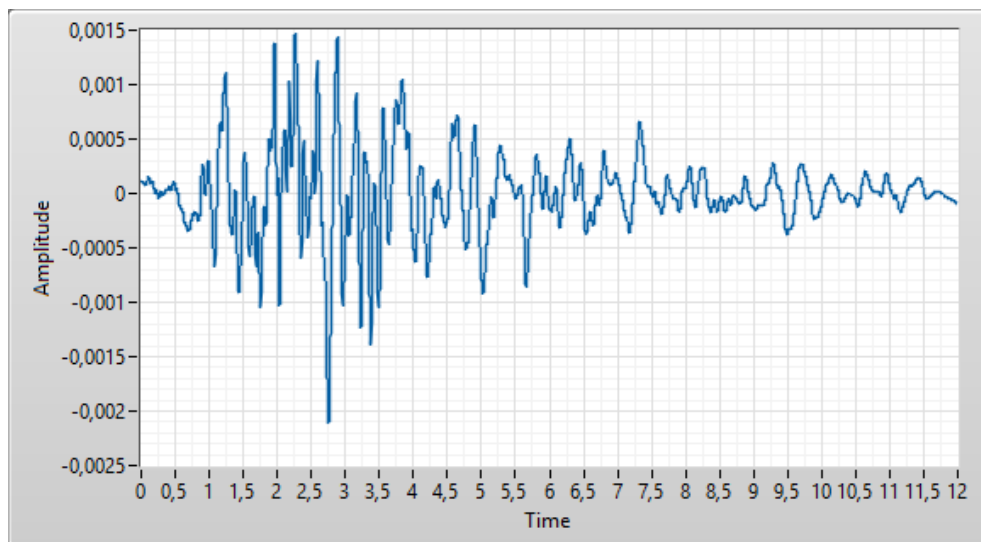
Para volver físicamente coherente el registro de velocidades se realiza la corrección de línea base, buscando un polinomio que se ajuste a la distribución de los puntos y asumiendo dicho polinomio como nuevo eje de referencia del diagrama.<sup>23</sup>

<sup>23</sup> Marcelo Romo Proaño, técnicas para la generación de diagramas de velocidades y diagramas de desplazamiento a partir de acelerogramas sísmicos, Centro de Investigaciones científicas, escuela politécnica del ejército.



**Figura 55. Polinomio por mínimos cuadrados**

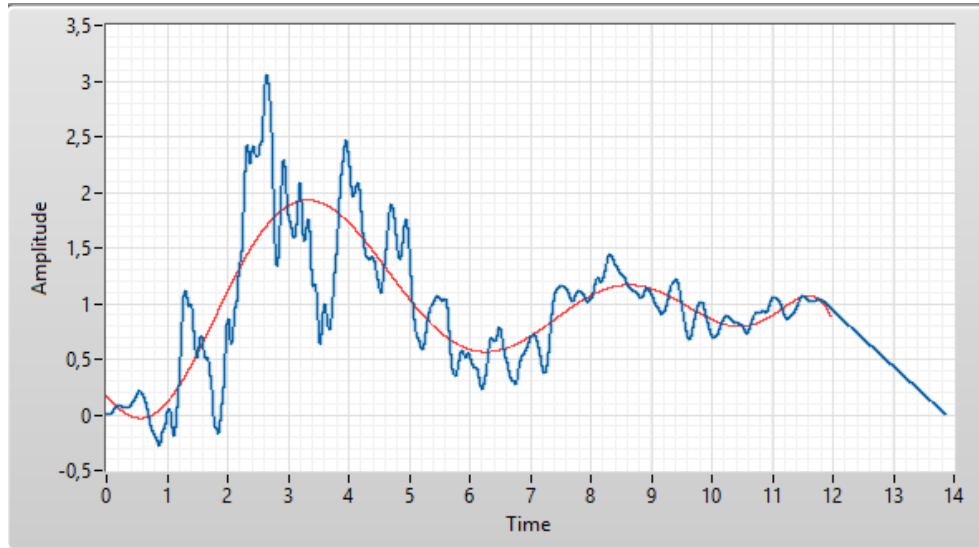
Una vez realizada la regresión por mínimos cuadrados, se ajusta el grado del polinomio que garantice que en  $t=0$  y en  $t=t.final$  ambas velocidades son 0. Una vez garantizadas estas condiciones se procede a realizar la corrección de línea base tomando el polinomio como eje de referencia. Se restan el diagrama de velocidades y el polinomio.



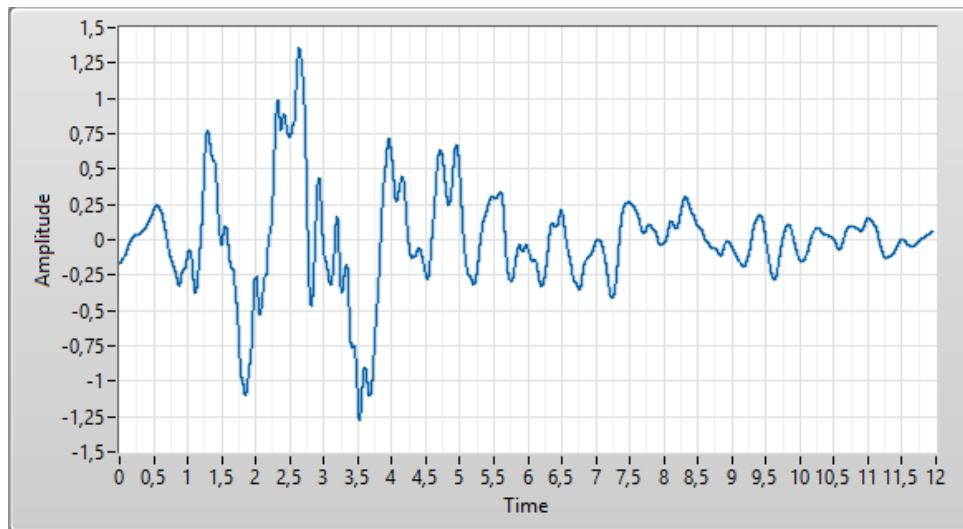
**Figura 56. Diagrama de velocidades de Northidge corregido**

El nuevo registro de velocidades es más coherente, pues existe una mejor distribución de los valores entre el eje positivo y negativo y por lo tanto existirá un mayor número de cruces sobre el eje de origen. Para determinar

el diagrama de desplazamientos del terreno, se integra numéricamente la nueva variable de velocidades ya corregida y se ejecutan lo mismos paso.



**Figura 57. Diagrama de desplazamientos sin corregir**

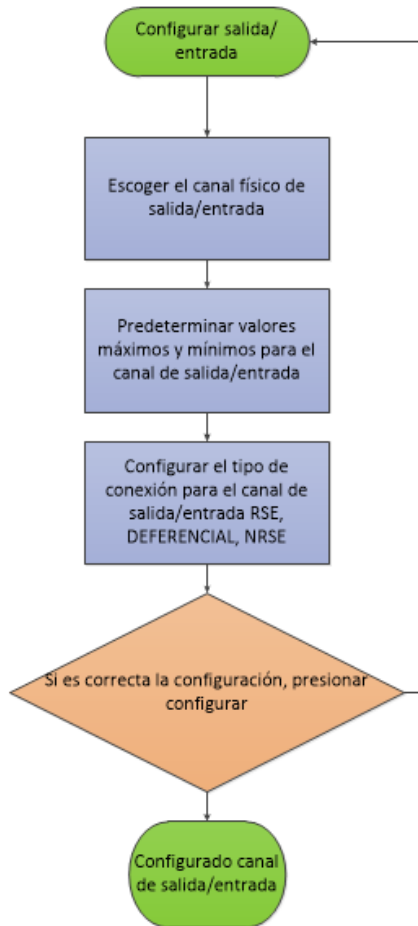


**Figura 58. Desplazamiento de Northridge corregidos**

Ya ajustado el diagrama de desplazamientos y velocidades para dicho acelerograma, la señal está lista para ser escalada en amplitud para luego ser transmitida al SmartAmp, este mismo proceso debe realizarse a las variables de velocidad y desplazamientos inferidas de acelerogramas

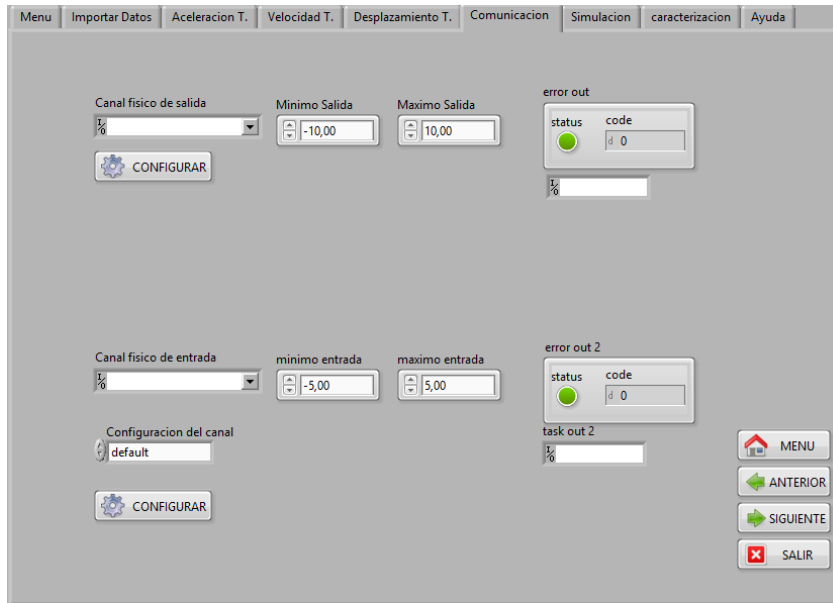
adquiridos por el módulo de vibraciones durante los ensayos, teniendo en cuenta siempre que el sistema no inicia acelerado o con una velocidad inicial distinta de cero.

## 10.5. Configuración de la DAQ 6341 para adquisición y generación de datos.



**Figura 59. Proceso para la configuración del canal de entrada o salida.**

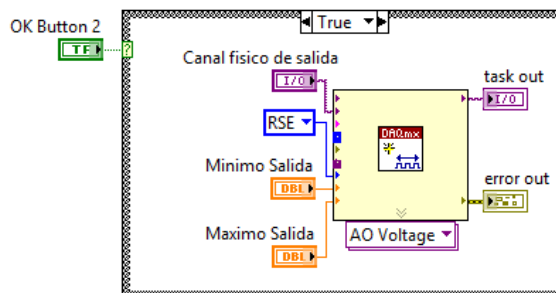
Una vez definido el escenario de simulación el siguiente paso es llevar esta señal de control al actuador ( shaker 2075e). Para esto se usa la Ni DAQ 6341 y uno de sus 2 canales de salida analógica.



**Figura 60. Sub menú “comunicación”**

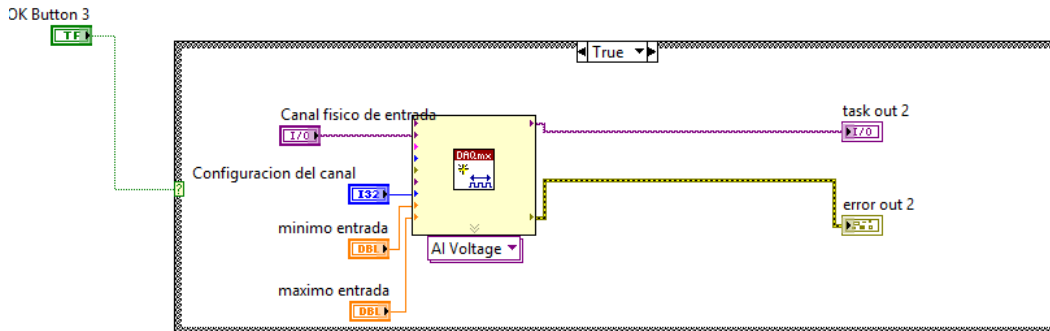
En la Figura 60 se muestra el sub menú comunicación, que tiene como función permitir al usuario realizar la mejor configuración de los canales de entrada y salida de la DAQ según las necesidades de la simulación. En este menú el usuario escoge el canal de entrada y salida de su preferencia, los voltajes máximos y mínimos esperados para asegurar la mayor resolución posible del ADC y el DAC y el tipo conexión para la adquisición de datos.

En la Figura 61 se aprecia el bloque de configuración para un canal de salida análoga de la DAQ 6341, la estructura case garantiza que la configuración se realice solo cuando el usuario considere que ya se han escogido los valores correctos de las variables de entrada para la configuración del puerto. El tipo de canal que se desea configurar se aprecia en el recuadro purpura y esta denotado como ( AO VOLTAGE ), el cual define que el puerto se configurara como ( canal de salida de tensión ).



**Figura 61. Configuración de salida análoga.**

Una vez configurado correctamente el canal de salida se iniciara la tarea (task out), que es una variable que contiene la configuración del canal de salida, esta variable puede convertirse en una variable local y puede llevarse a cualquier parte del programa donde se necesite la configuración del puerto para generar una señal de control desde la DAQ.



**Figura 62. Configuración de entrada analógica (adquisición)**

El bloque de programación para la configuración del canal de entrada es idéntico al anterior y el proceso para la configuración es el mismo, tal como se observa en el diagrama de flujo de la Figura 59, sin embargo la configuración del bloque, varia en que se ha escogido la opción (AI VOLTAGE) o (entrada analógica de tensión); de esta forma la configuración almacenada en el (task 2) puede ser utilizada en cualquier aplicación en la que se necesite adquirir datos provenientes de los sensores de aceleración.

## 11. Módulo de vibraciones, implementado y pruebas de validación



**Figura 63. Modelos Sobre la mesa Vibratoria**

En la imagen anterior se muestra la mesa vibratoria implementada e instrumentada y sobre ella alguno de los modelos a escala que ya se han probado sobre la misma. Los modelos creados para los ensayos de validación, fueron implementados con el kit de piezas para ensayos dinámicos y estáticos de la empresa PASCO, el cual permite desarrollar un gran número de modelos con geometrías variadas debido a la versatilidad en el ensamblaje de las piezas y la homogeneidad en las propiedades mecánicas de las mismas que desde el punto de vista académico son ideales para la calibración de modelos.<sup>24</sup>



**Figura 64. Set de estructuras Pasco**

<sup>24</sup> Set avanzado de estructuras Pasco, [http://www.pasco.com/prodCatalog/ME/ME-6992\\_advanced-structures-set/index.cfm#overviewTab](http://www.pasco.com/prodCatalog/ME/ME-6992_advanced-structures-set/index.cfm#overviewTab), consultado [ago 13, 2014]

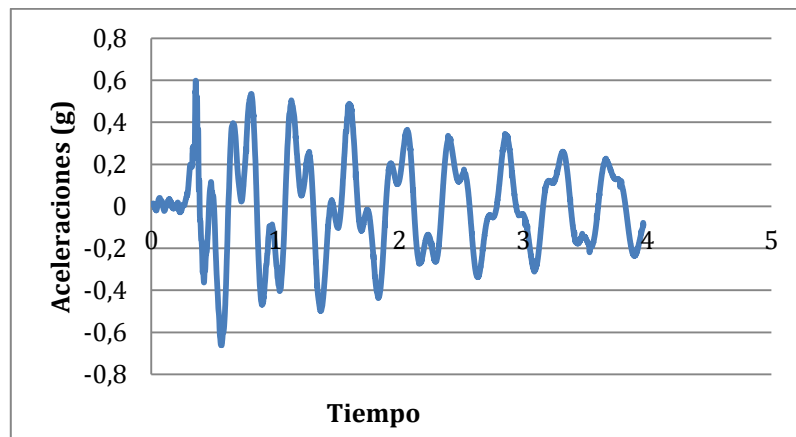
### 11.1. Ensayos de vibración libre.

Primordialmente con esta prueba se busca encontrar el periodo fundamental Del modelo y las frecuencias para cada uno de los modos de vibración del mismo. Para esta prueba el modelo de estudio fue una estructura rectangular de dos niveles, para la cual cada nivel posee una masa aproximada de 200g como se muestra en la Figura 65.



**Figura 65. Estructura de dos niveles.**

Para este ensayo se aplica una deformación inicial sobre el piso intermedio del modelo, se instala uno de los acelerómetros en el nivel intermedio, se suelta el modelo para que vibre libremente y se capturan las aceleraciones mientras la estructura vuelve al reposo.

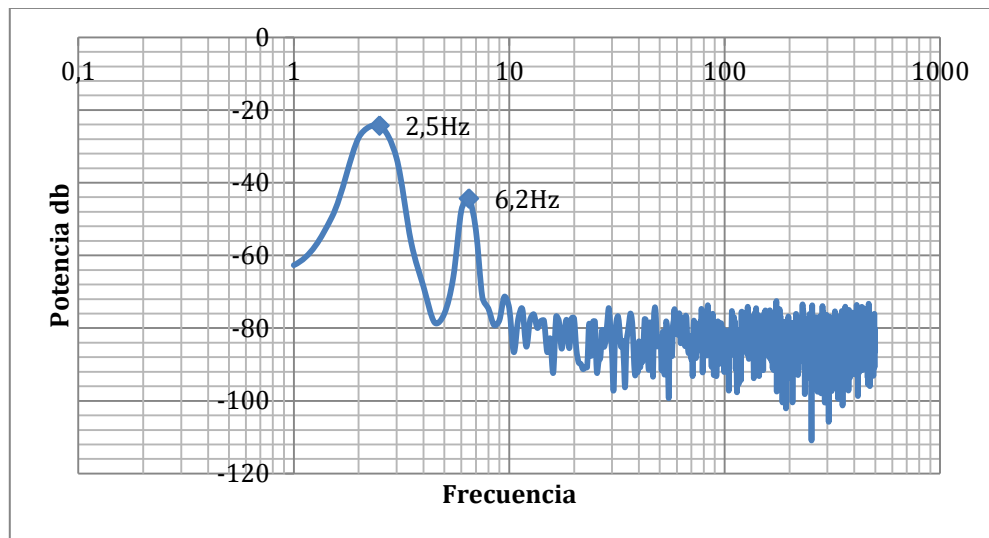


**Figura 66. Ensayo vibración libre**

A diferencia de sistemas anteriormente mencionados en el marco teórico, el modelo de dos grados de libertad no solo vibra en forma de una onda

sinusoidal decreciente en amplitud como los modelos de un solo grado, en cambio se observa una oscilación decreciente un tanto distorsionada debido a los 2 periodos de vibración que rigen el sistema. Por tanto, dicho acelerograma es la mezcla del periodo fundamental de la estructura y el segundo modo de vibración existente

De lo anteriormente mencionado se puede concluir que al realizar la descomposición en el dominio de la frecuencia de los datos obtenidos la potencia de la señal debe estar concentrada en los dos periodos de vibración del modelo. La descomposición de Fourier del acelerograma obtenido se muestra en la siguiente figura.



**Figura 67. Diagrama de frecuencias para modelo con dos grados de libertad.**

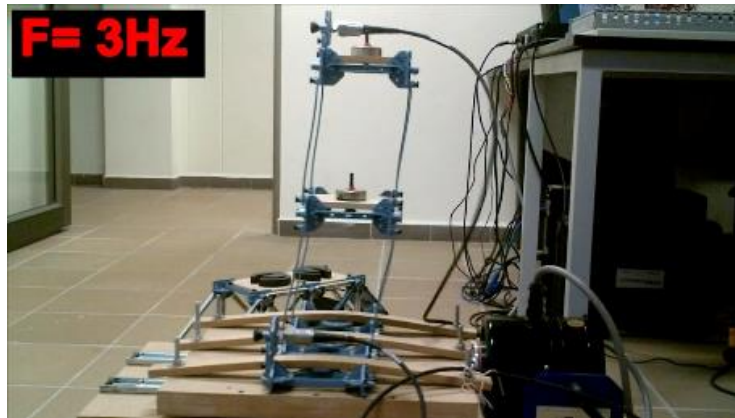
El análisis de Fourier ratifica que para una estructura de dos grados de libertad, existen dos frecuencias en la cual se concentran sus oscilaciones, como resultado de aplicar un análisis de Fourier sobre los datos obtenidos, se obtienen dos picos de potencia que pertenecen a las frecuencias de vibración del modelo, siendo la mas baja el fundamental y la segunda perteneciente a 2do modo de vibración.

$$F_{fundamental} \approx 2.5Hz$$

$$Segundo\ modo \cong 6.2Hz$$

## 11.2. Ensayo de resonancia.

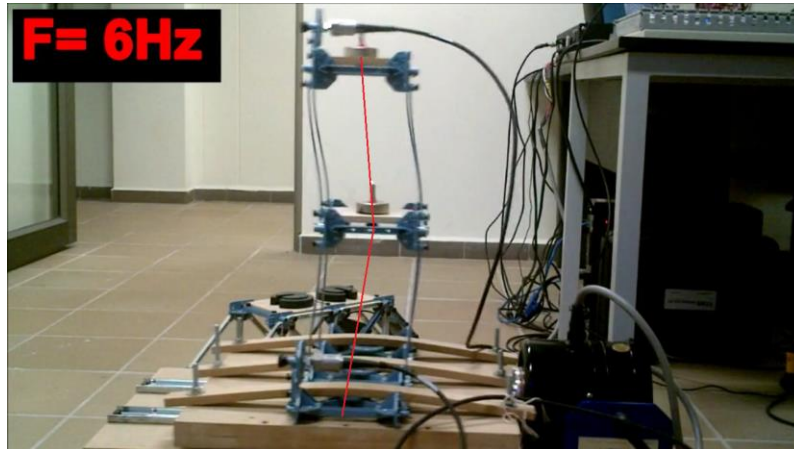
Habiendo identificado las frecuencias de oscilación del modelo es posible verificarlas aplicando excitaciones armónicas con frecuencias iguales a las calculadas en el ensayo anterior. Como propone la teoría de la dinámica estructural al aplicar vibraciones con igual frecuencia que la fundamental puede llevarse el modelo a un estado de resonancia, donde no se contrarrestan las fuerzas dinámicas del modelo y las aplicadas y por lo tanto allí se registran los desplazamientos de mayor amplitud. Para realizar este ensayo se simula en el equipo una onda sinusoidal de frecuencia variable de esta forma se pueden observar a simple vista los modos de vibración y los cambios que sufre la dinámica del modelo a medida que cambian las frecuencias de excitación.



**Figura 68. Frecuencia aproximada a la fundamental**

Como se observa en la Figura 68, al aplicar a la base de la estructura desplazamientos sinusoidales con una frecuencia cercana a 2.5Hz, el modelo empieza a oscilar de acuerdo al modo fundamental de vibración, modo en el cual el modelo oscila de lado a lado articulándose solo en la base, en este punto se puede verificar que tanto por el ensayo de resonancia como en el ensayo de movimiento libre, el modo fundamental de vibración se encuentra entre los 2Hz y los 3Hz.

Ahora se debe comprobar que el segundo modo de vibración se encuentra cerca a los 6 Hz, tal como lo muestra la descomposición de Fourier, para esto, al igual que en el caso anterior se hace vibrar la base del modelo a una frecuencia de 6Hz, buscando que el segundo modo entre en resonancia como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 69. Frecuencia aproximada al segundo modo de vibración.**

Como se observa en la Figura 69 el modelo estructural se articula alrededor de la segunda planta, además se observa un aumento considerable en la amplitud de los desplazamientos de la placa, lo que indica que el segundo modo entro en resonancia con una frecuencia aproximada de 6Hz.

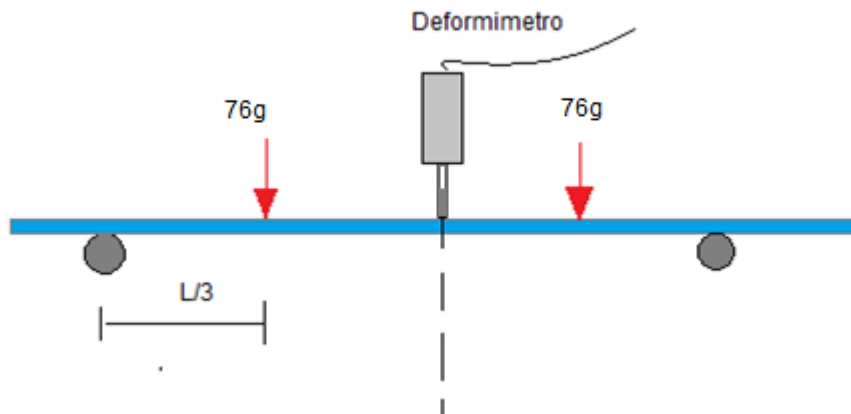
### **11.3. Calculo del módulo de elasticidad.**

En este ensayo se busca determinar una de las propiedades mecánicas de los materiales con los que se construyen los modelos, mediante una prueba estática, y otra dinámica, donde al final se comparan los resultados obtenidos mediante los dos experimentos.

#### **11.3.1. Cálculo del módulo de elasticidad, mediante la medición de la deformación de una viga simplemente apoyada.**

En este ensayo se determinó el módulo de elasticidad de una pieza de plástico del set de estructuras Pasco, midiendo la deformación vertical en el centro del elemento como se observa en la Figura 70, la cual muestra al planteamiento del ensayo.

Para este ensayo se tomó una viga de plástico, y se apoyó en dos puntos, con una luz de 140.6 mm, se cargó y se descargó repetidamente con dos masas iguales de 76g ubicadas a  $L/3$  de cada apoyo, las deformaciones en el centro de la viga fueron leídas por un deformímetro electrónico con capacidad de medición máxima de hasta 50 mm y mínimas a una centésima de milímetro.



**Figura 70. Planteamiento del ensayo**

Los datos con los cuales se determinará el valor del módulo de elasticidad, son los que se muestran a continuación.

Longitud entre apoyos: 140,6mm

Tercio de la longitud: 46,9mm

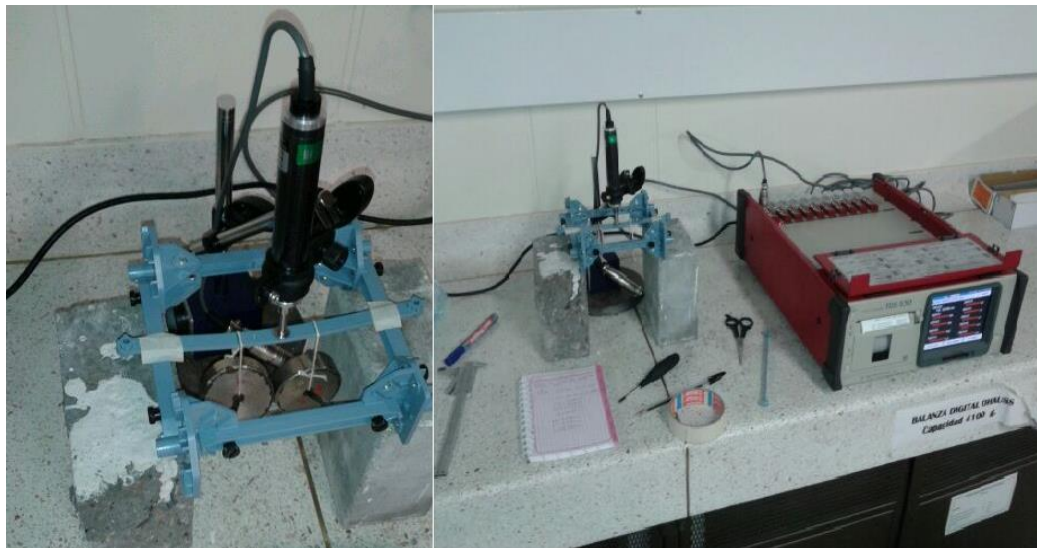
Masa1: 76g

Masa2: 76g

Perfil del elemento: Rectangular

Base Sección Transversal: 11.1mm

Altura Sección Transversal: 2.6mm



**Figura 71. Montaje final del ensayo estático.**

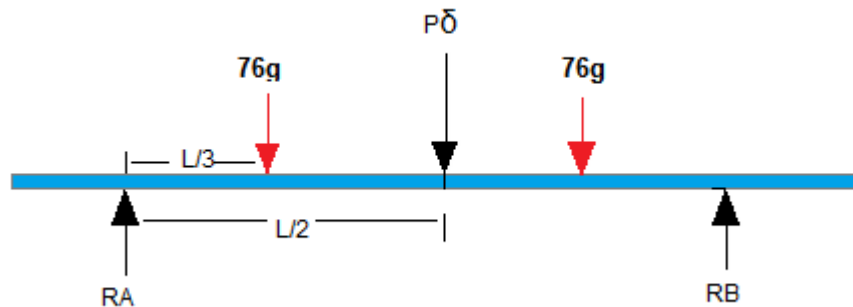
La Figura 71 muestra la disposición final de los dispositivos para el ensayo de carga y descarga del elemento.

**Tabla 5. Resultados, ensayo de deformación.**

$\delta$ (mm)	Repeticiones
2,180	1ra
2,258	
2,142	2da
2,278	
2,322	3ra
2,349	

La Tabla 5 muestra los resultados de las tres (3) repeticiones de toma de datos que se obtuvieron de la deformación del elemento, los datos son congruentes y no poseen una gran dispersión entre ellos. Ahora se prosigue a calcular el módulo de elasticidad de la viga usando el Método de análisis de estructuras conocido como el 2º Teorema de Castigliano.

Partiendo del diagrama esquemático de la Figura 70Figura 72, lo primero que se debe realizar es calcular una expresión para las reacciones en los apoyos del sistema



**Figura 72. Estática del sistema.**

Cálculo de las reacciones en función de  $P\delta$ .

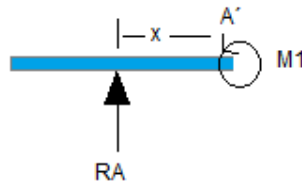
$$R_A \rightarrow 0.7585 + 0.5P$$

$$R_B \rightarrow 0.7585 + 0.5P$$

Obtenidas las reacciones en RA y RB, se procede a calcular la ecuación de momentos para cada uno de los cortes posibles, a lo largo de la longitud del elemento.

Corte 1:  $0 \leq x \leq 46.866 \text{ mm}$

En la Figura 73, se observa el diagrama del corte 1, se realiza momento en el punto A' y se determina el valor del momento M1, después de obtener este valor, se realiza el cálculo de la derivada parcial respecto a la fuerza Pδ del primer corte, que hace parte del método de Castigliano.



**Figura 73. Corte 1 de la Viga Analizada.**

$$\sum MA' = 0 = -(0.7585 + 0.5P) * x + M1$$

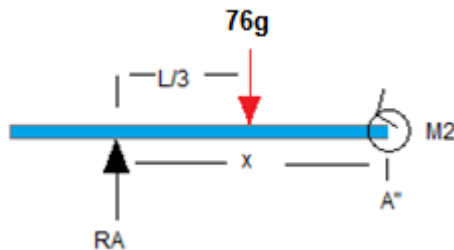
$$M1 \rightarrow 0.7585x + 0.5Px$$

El teorema de Castigliano solicita derivar implícitamente el momento de cada corte, respecto a la carga virtual Pδ.

$$\frac{\partial}{\partial P\delta}(0.7585x + 0.5Px)$$

$$\frac{\partial M1}{\partial P\delta} = 0.5x$$

En la Figura 74, se observan las cargas y reacciones que se deben aplicar a la estructura, como se muestra, se realiza el momento en el punto A''.



**Figura 74. Diagrama Corte 2.**

A continuación se muestra este proceso.

$$\sum MA'' = 0 = -(0.7585 + 0.5P) * x + 0.7585 * (x - (140.6/3)) + M2$$

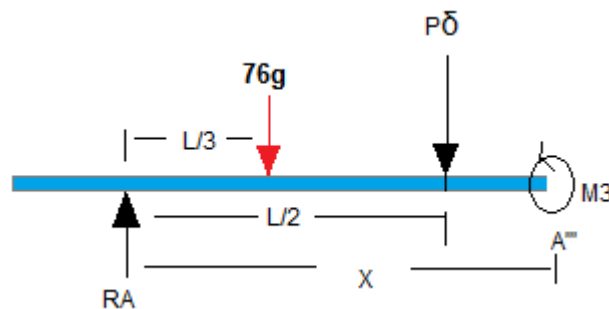
$$M2 \rightarrow 35.54836 + 0.5Px$$

$$\frac{\partial_{P\delta}(35.54836 + 0.5Px)}{\partial_{P\delta}} = 0.5x$$

En el corte 3, aparece la carga imaginaria, que está ubicada en el punto donde se están determinando las deflexiones.

**Corte 3:  $70.3 \text{ mm} \leq x \leq 93.73 \text{ mm}$**

En la Figura 75, se observan todas las cargas que afectan el momento en el punto A''', se debe realizar la sumatoria de momento



**Figura 75. Diagrama Corte 3.**

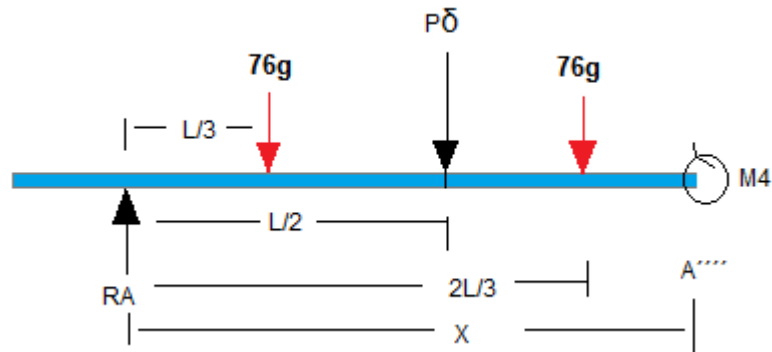
$$\sum MA''' = 0 = -(0.7585 + 0.5P) * x + 0.7585 * (x - (140.6/3)) + P * (x - 70.3) + M3$$

$$M3 \rightarrow 35.548 + 70.3P - 0.5Px$$

$$\frac{\partial_{P\delta}(35.548 + 70.3P - 0.5Px)}{\partial_{P\delta}} = 70.3 - 0.5x$$

El último corte se observa en la Figura 76, y allí se ven todas las cargas que se deben utilizar para realizar el momento en el punto A''''.

**Corte 4:  $93.73 \text{ mm} \leq x \leq 140.6 \text{ mm}$**



**Figura 76. Diagrama Corte 4.**

A continuación se muestra el cálculo del momento en el punto del corte, de tal manera que se obtiene el momento del corte 4 (M4).

$$\sum MA'''' = 0 = -(0.7585 + 0.5P) * x + 0.7585 * (x - (140.6/3)) + P * (x - 70.3) + 0.7585 * (x - 93.73333333333333) + M4$$

$$M4 \rightarrow 106.645 + 70.3P - 0.7585x - 0.5Px$$

$$\partial_{P\delta}(106.645 + 70.3P - 0.7585x - 0.5Px)$$

$$\frac{\partial_{M4}}{\partial_{P\delta}} = 70.3 - 0.5x$$

Una vez encontrados los momentos para las secciones y la derivada implícita de estos respecto a la carga  $P\delta$ , se procede a determinar la ecuación de la deflexión en función de la elasticidad (E) utilizando la siguiente expresión.

$$\delta = \frac{\int M \frac{\partial M}{\partial P\delta} dx}{E * I}$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material, I es la inercia de la sección transversal, M los momentos de los cortes 1 a 4 y las derivadas parciales respecto a la carga, a continuación se muestran los cálculos necesarios para la obtención de este parámetro.

$$\text{Inercia} \rightarrow \frac{11.1 * 2.6^3}{12} \text{ Para una sección rectangular.}$$

$$\text{Inercia} \rightarrow 16.2578 \text{ mm}^4$$

$$\delta == (1/(\text{Elasticidad} * 16.2578)) * ((\int_0^{140.6/3} ((0.7585x) * (0.5 * x)) dx) + (\int_{140.6/3}^{140.6/2} ((35.548) * (0.5 * x)) dx) + (\int_{140.6/2}^{2*140.6/3} ((35.548) * (70.3 - 0.5x)) dx) + (\int_{140.6/2}^{2*140.6/3} ((106.645 - 0.7585x) * (70.3 - 0.5x)) dx))$$

Evaluando las integrales anteriores se obtiene la siguiente expresión, que correlaciona la elasticidad del material en MPa (Mega Pascales) con las deformaciones verticales obtenidas en el experimento y que se observan en la Tabla 5.

$$\delta == \frac{5703.213}{\text{Elasticidad}}$$

A continuación, en la Tabla 6 se promedian las deformaciones obtenidas y se evalúan en la expresión anterior para encontrar el módulo de elasticidad del material.

**Tabla 6. Módulos de elasticidad en MPa**

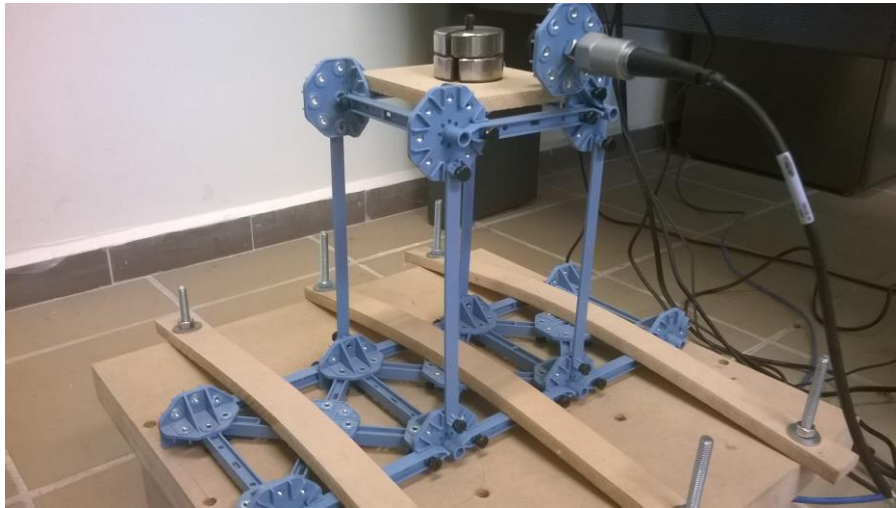
$\delta$ (mm)	E (MPa)
2,180	2616,151376
2,258	2525,779451
2,142	2662,563025
2,278	2503,604039
2,322	2456,162791
2,349	2427,931034
elasticidad	2532,031953

Al final se obtuvo un módulo de elasticidad promedio de **2532 MPa**.

Este valor se compara con el resultado del módulo de elasticidad que se obtendrá mediante la prueba dinámica que se presenta a continuación.

### **11.3.2. Determinación del módulo de elasticidad mediante el ensayo dinámico de vibración libre, para un modelo de un grado de libertad.**

Para este ensayo se construyó un pequeño modelo a escala de un grado de libertad, que tiene como columnas 4 perfiles idénticos al evaluado en el numeral 11.3.1.



**Figura 77. Modelo de un grado de libertad para ensayo dinámico.**

El ensayo consiste en realizar una prueba de vibración libre, en la cual se capturan las aceleraciones en la parte superior del modelo, con esto se determina el periodo fundamental del sistema, y conociendo propiedades de los elementos como la inercia y la masa del sistema es posible inferir la elasticidad de las piezas.

Los datos iniciales utilizados para la determinación del módulo de elasticidad, por el ensayo de vibración libre son los que se muestran a continuación.

Masa del sistema: 848g

Número de columnas: 4

Base Sección transversal = 11.1mm

Altura Sección Transversal = 2.6mm

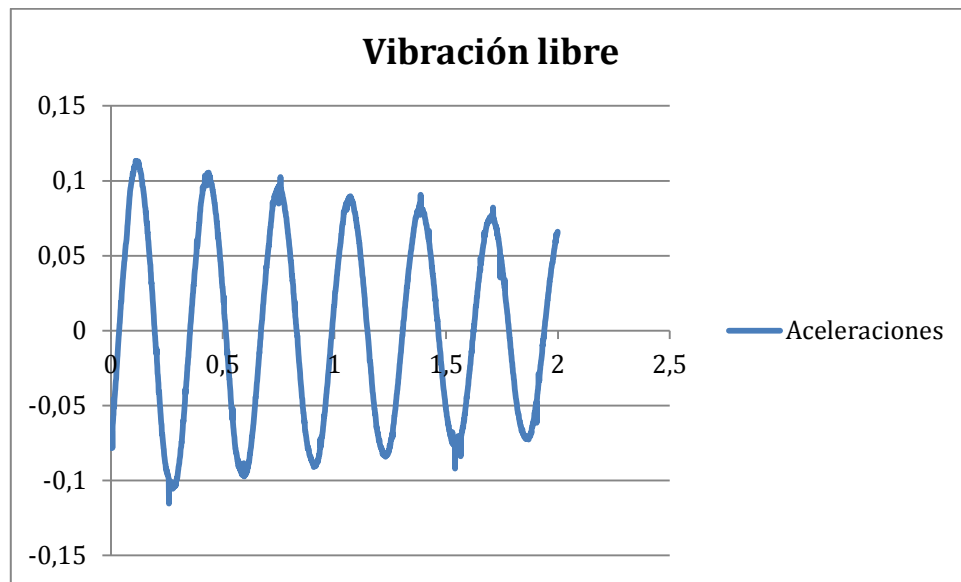
Longitud de las Columnas (de nodo a nodo) = 18 cm

Longitud Efectiva de las Columnas = 14 cm.

La longitud efectiva del elemento, se tiene en cuenta, ya que la dimensión del nodo que se está utilizando para unir los elementos, hace esta sección muy

rígida y aproximadamente (2 cm) del elemento que está ubicado en el nodo no está trabajando, para el modelo. Por esta razón, se realiza este proceso de las longitudes.

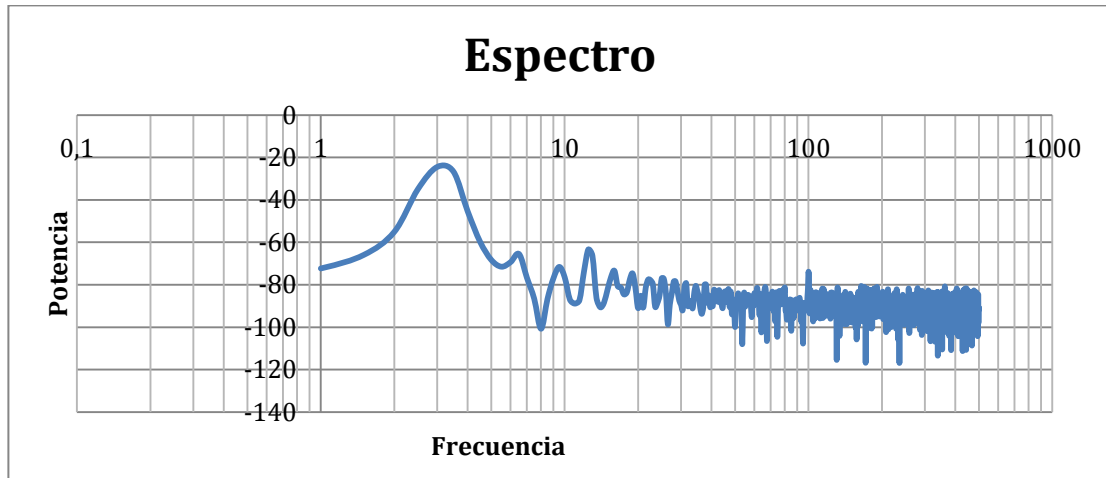
La Figura 78 es el diagrama de aceleraciones vs tiempo, medido en la planta superior del modelo. Como se observa, la respuesta se asemeja a una onda sinusoidal casi perfecta, de amplitud decreciente (amortiguamiento).



**Figura 78. Vibración libre, un grado de libertad.**

A diferencia de la señal obtenida para un modelo de dos grados de libertad, se nota claramente que la respuesta se concentra alrededor de una única frecuencia; que para estos casos es el fundamental, la única forma de vibración del modelo.

La descomposición de Fourier de la señal anterior, se observa en la Figura 79, claramente se puede identificar que la frecuencia en la cual se concentra la mayor parte de la potencia de la señal adquirida es de 3,154 Hz.



**Figura 79. Espectro, sistema de un grado de libertad.**

De los datos anteriores se puede concluir, que el periodo fundamental del sistema es de 0,317 s; y la frecuencia fundamental es aproximadamente 3,154 Hz.

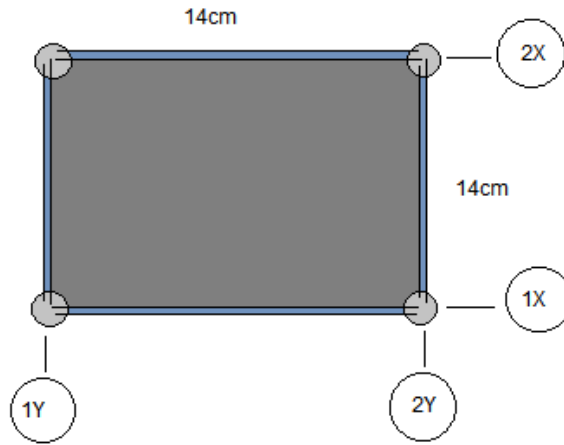
$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{3.154\text{Hz}} = 0.317 \text{ s}$$

$$\omega = 2 * \pi * f = 2 * \pi * 3.154 = 19.82 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Obtenidos el periodo y la frecuencia angular del sistema, junto con las propiedades físicas de los segmentos que conforman el modelo, el siguiente paso es inferir el módulo de elasticidad del material a partir del análisis dinámico de la estructura de un grado de libertad.

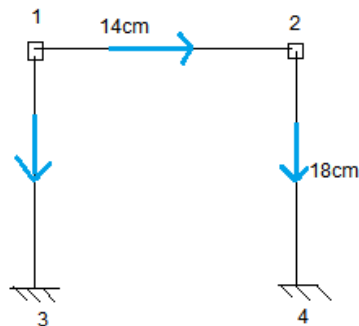
A continuación se realiza el análisis dinámico de la estructura, calculando la matriz de rigidez del modelo, usando el método de **análisis matricial**. Se calcula la matriz de rigidez, así se obtendrá un modelo matemático del sistema en función del módulo de elasticidad, el cual es la propiedad del material que se busca determinar, y esto se lograra anexando al modelo matemático de la estructura los valores de frecuencia de vibración obtenidas mediante el ensayo de vibración libre.

Como primera parte se calcula la inercia de cada una de las secciones que se encuentran en el modelo as escala, y se realiza un despiece del mismo dependiendo de cada uno de los pórticos que lo conforman



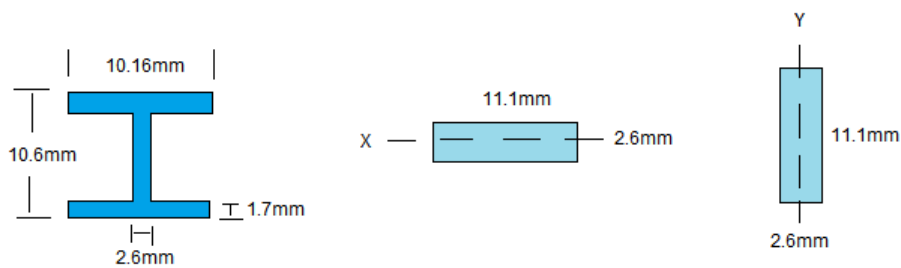
**Figura 80. Planta estructural del modelo.**

En la Figura 80 se observan los ejes anotados sobre la planta del modelo a escala, a continuación se referencian los pórticos del sistema en los sentidos X y Y.



**Figura 81. Pórticos, 1x-1x, 2x-2x, 1y-1y, 2y-2y.**

La Figura 81, muestra la simetría que mantiene el modelo en sus ejes, en pocas palabras es una estructura de un piso con cuatro lados iguales, sin embargo la inercia de los elementos varía según la sección transversal del mismo y el eje de estudio.



**Figura 82. Perfiles viga y columna.**

Como se observa en la Figura 82, el perfil transversal de las vigas en el modelo es en forma de I, mientras que el de las columnas es un perfil rectangular.

**Tabla 7. Valores de inercia en  $m^4$**

Perfil	Valor
viga eje x	6,92112E-10
viga eje y	6,92112E-10
columna eje x	1,62578E-11
columna eje y	2,9632E-10

Ahora se debe calcular una matriz de rigidez para cada uno de los elementos que componen los pórticos en los diferentes ejes; esto se hace aplicando las convenciones descritas en la siguiente figura.

$$[K] = Ro \cdot \begin{bmatrix} \beta \cdot c^2 + 12 \cdot s^2 & s \cdot c \cdot (12 - \beta) & 6 \cdot L \cdot s & -\beta \cdot c^2 - 12 \cdot s^2 & s \cdot c \cdot (\beta - 12) & 6 \cdot L \cdot s \\ s \cdot c \cdot (12 - \beta) & \beta \cdot s^2 + 12 \cdot c^2 & 6 \cdot L \cdot c & s \cdot c \cdot (\beta - 12) & -\beta \cdot s^2 - 12 \cdot c^2 & 6 \cdot L \cdot c \\ \hline 6 \cdot L \cdot s & 6 \cdot L \cdot c & 4 \cdot L^2 & -6 \cdot L \cdot s & -6 \cdot L \cdot c & 2 \cdot L^2 \\ -\beta \cdot c^2 - 12 \cdot s^2 & s \cdot c \cdot (\beta - 12) & -6 \cdot L \cdot s & \beta \cdot c^2 + 12 \cdot s^2 & s \cdot c \cdot (12 - \beta) & -6 \cdot L \cdot s \\ s \cdot c \cdot (\beta - 12) & -\beta \cdot s^2 - 12 \cdot c^2 & -6 \cdot L \cdot c & s \cdot c \cdot (12 - \beta) & \beta \cdot s^2 + 12 \cdot c^2 & -6 \cdot L \cdot c \\ \hline 6 \cdot L \cdot s & 6 \cdot L \cdot c & 2 \cdot L^2 & -6 \cdot L \cdot s & -6 \cdot L \cdot c & 4 \cdot L^2 \end{bmatrix}$$

Donde:

$$Ro = \frac{\text{Elasticidad} \cdot \text{Inercia}}{\text{Longitud}^3} \quad \text{Área} = \text{Base} \cdot \text{Altura} \quad \text{Inercia} = \frac{\text{Base} \cdot \text{Altura}^3}{12}$$

$$\beta = \frac{\text{Área} \cdot \text{Longitud}^2}{\text{Inercia}} \quad c = \text{coseno } \alpha \quad s = \text{seno } \alpha \quad L = \text{Longitud}$$

**Figura 83. Matriz de rigidez elemento.<sup>25</sup>**

Con el marco de la matriz elemento, predispuesta en la Figura 83, se calcula la matriz de rigidez para cada elemento, teniendo en cuenta que  $\alpha$  es el Angulo de direccionamiento de los elementos estructurales, respecto a los ejes globales, de esta forma  $\alpha$  tendrá un valor de  $90^\circ$  para las columnas y  $0^\circ$  para las vigas.

<sup>25</sup> Claudia P. Retamoso Llamas, Tito L. Fernández Báez ejemplo de utilización del programa ANEST 3D en análisis de estructuras en tres dimensiones (estructura constituida por pórticos). Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

**Tabla 8. Factores Viga, pórtico 1x-1x**

Área =	5,17418E-05	m2
L =	0,14	M
c =	1	
s =	0	
ro =	2,52227E-07	E
beta =	1465,282763	

**Tabla 9. Rigidez viga, 1x-1x en función de E**

0,000369585	0	0	-0,00036958	0	0	E
0	3,02673E-06	2,11871E-07	0	-3,02673E-06	2,11871E-07	
0	2,11871E-07	1,97746E-08	0	-2,11871E-07	9,88732E-09	
-0,00036958	0	0	0,000369585	0	0	
0	-3,02673E-06	-2,11871E-07	0	3,02673E-06	-2,11871E-07	
0	2,11871E-07	9,88732E-09	0	-2,11871E-07	1,97746E-08	

**Tabla 10. Factores columnas, pórtico 1x-1x**

Área =	0,00002886	m2
L =	0,18	M
c =	0	
s =	1	
ro =	2,78769E-09	E
beta =	57514,7929	

**Tabla 11. Rigidez columnas, 1x-1x en función de E**

3,34523E-08	0	3,0107E-09	-3,3452E-08	0	3,0107E-09	E
0	0,00016033	0	0	-0,00016033	0	
3,0107E-09	0	3,61284E-10	-3,0107E-09	0	1,8064E-10	
-3,3452E-08	0	-3,0107E-09	3,34523E-08	0	-3,011E-09	
0	-0,0001603	0	0	0,000160333	0	
3,0107E-09	0	1,80642E-10	-3,0107E-09	0	3,6128E-10	

Una vez definidas las matrices de rigidez para cada elemento del pórtico, se procede a definir la matriz global del mismo, realizando operaciones entre las submatrices de 3x3 que se observan en la Tabla 9 y Tabla 8. Estas operaciones son las siguientes.

-La primera sub matriz de 3x3 de la matriz global del pórtico, se define como la suma de las submatrices resaltadas en color amarillo.

-La segunda se define como la misma segunda submatriz de 3x3 de la viga, la cual se encuentra resaltada en color azul.

-La tercera se define la misma tercera submatriz de 3x3 de la viga, la cual se resalta en color gris.

-La cuarta se define como la suma de la primera submatriz de la columna, resaltada en color amarillo, con la cuarta submatriz de la viga, la cual se encuentra resaltada en color verde.

Aplicando las operaciones anteriormente mencionadas, se obtiene la matriz de rigidez global del pórtico en función del módulo de elasticidad E.

**Tabla 12. Matriz de rigidez global del pórtico 1x-1x**

0,000369618	0	3,0107E-09	-0,00036958	0	0	E
0	0,00016336	2,11871E-07	0	-3,02673E-06	2,11871E-07	
3,0107E-09	2,11871E-07	2,01359E-08	0	-2,11871E-07	9,88732E-09	
-0,00036958	0	0	0,000369618	0	3,0107E-09	
0	-3,02673E-06	-2,11871E-07	0	0,00016336	-2,11871E-07	
0	2,11871E-07	9,88732E-09	3,0107E-09	-2,11871E-07	2,01359E-08	

Resolviendo la matriz de rigidez del pórtico, se encuentra una expresión para la rigidez global del pórtico 1x-1x en el sentido del eje X, como se ha trabajado desde el principio, dicho valor para la rigidez se encuentra en función del módulo de elasticidad E.

$$K_{portico1x - 1x} = 6,63007E - 08 * E$$

La rigidez del modelo en el sentido del eje X se puede calcular como la suma de la rigidez aportada por los pórticos que trabajan en este sentido, que para este caso son los pórticos 1x-1x y 2x-2x; como se analizó en un principio, estos dos pórticos anteriormente nombrados son idénticos, por lo cual se puede estipular que la rigidez que aporta el pórtico 2x-2x es idéntica a la anteriormente calculada para el pórtico 1x-1x.

$$K_{portico2x - 2x} = 6,63007E - 08 * E$$

Para calcular la rigidez del modelo en el eje de interés, que para este caso es el eje X, se debe sumar la rigidez de cada uno de los pórticos del modelo que aporten al sistema en el sentido de vibración, esto debido a que ambos trabajan de forma paralela a la dirección del movimiento, por tanto la rigidez del modelo en el sentido del eje x es.

$$k_{sistema_{Eje_x}} = k_{portico1x-1x} + k_{portico2x-2x} = 1,32601E - 07 * E$$

De la misma manera, es posible calcular una expresión para la rigidez del sistema en el sentido del eje Y, pero no es necesario calcularla debido a que los datos de vibración del ensayo dinámico fueron tomados haciendo vibrar el modelo en la dirección X, de todas formas el procedimiento para calcular la rigidez del sistema en el eje Y, se encuentran en el Anexo B.

Una vez calculada la expresión para la rigidez del modelo mediante el método matricial, se procede a calcular un valor experimental para la rigidez del modelo a partir de los resultados obtenidos mediante el ensayo de vibración libre.

Experimentalmente La rigidez del modelo, se obtiene suponiendo que la base está empotrada. Que pertenecen al modelo cuatro (4) columnas. Las columnas trabajan en paralelo, de tal manera que se suman las rigideces de las cuatro (4) columnas, partiendo de la frecuencia angular del sistema, que se obtiene con la ecuación que se muestra a continuación:

$$w = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Masa en mega gramos = 0,000848 Mg

Una vez calculada la frecuencia angular, natural del sistema, se puede inferir la rigidez del modelo k, partiendo de la expresión mostrada anteriormente, donde m es la masa en Mega gramos del modelo.

$$k_{sistema} = w^2 * m = (19.82^2) * 0.000848 = 0,3428kN/m$$

**Rigidez del modelo**

$$k_{col} = \frac{k}{4} = \frac{0.3331}{4} = 0.0832kN/m$$

**Rigidez de una columna**

Se ha calculado un valor experimental para la rigidez del modelo a partir de su respuesta dinámica, y una expresión teórica de la rigidez del modelo en función del módulo de elasticidad del material, ahora es posible igualar ambas expresiones y encontrar un valor experimental para el módulo de elasticidad del material, tal y como se muestra a continuación.

$$0,3428 \frac{KN}{m} = 1,32601E - 07 * E$$

$$E = 2585,278Mpa$$

***Módulo de elasticidad experimental***

**Tabla 13. Resultados módulo de elasticidad por ensayo estático y vibración libre**

Ensayo estático	2532	MPa
Ensayo Dinámico	2585	MPa
Diferencia	53	MPa

Los resultados anteriores, no se pueden comparar en un porcentaje de error, ya que ambos son experimentales, pero la diferencia entre los dos está siendo mínima, por lo cual, se considera que la suposición de la longitud efectiva del elemento está dando un resultado apropiado, respecto a lo obtenido con el módulo estático. De esta forma se ha determinado el módulo de elasticidad de un material desconocido mediante una primera prueba estática, y una segunda prueba dinámica (vibración libre), realizada en el módulo de vibraciones. La simulación comparativa entre el modelo Matemático (teórico) y el modelo real pueden verse en el Anexo C.

## 12. Conclusiones

Con la elaboración de este proyecto, se han diseñado he implementado satisfactoriamente los sistemas de adquisición de datos y generación de señales de control, para el actuador shaker 2075e. Además de la implementación de instrumentos virtuales de control desarrollados en labview, que permiten a los usuarios llevar a cabo una gran variedad de ensayos generando entornos de vibración controlados sobre modelos a escala o materiales con diferentes características, de esta manera pueden comprobar conceptos teóricos sobre la dinámica de modelos y materiales, o el desarrollo de ensayos de investigación como los descritos en los numerales 11.2 , 11.3.1 y 11.3.2 de este libro.

Se ha demostrado la importancia del uso de nuevas tecnologías en el campo de la ingeniería civil; más específicamente en la ventaja que pueden traer los dispositivos electrónicos para la adquisición de variables físicas en el estudio de la dinámica estructural y la modelación a pequeña escala; a la vez, se se deja abierta la posibilidad de adaptar sistemas similares a edificaciones reales, que permitan realizar actualizaciones de modelos o monitoreo en tiempo real de las estructuras, durante movimientos telúricos de pequeña o gran magnitud.

El trabajo conjunto entre la ingeniería electrónica e ingeniería civil, en el desarrollo de este proyecto, ha permitido crear un dispositivo que suple las necesidades planteadas durante el diseño de la mesa vibratoria; necesidades que provienen de la mecánica de los ensayos y los procesos que se desarrollaran con la construcción de la mesa; desde otro punto de vista, necesidades planteadas por los ingenieros civiles y que se han solventado satisfactoriamente con los dispositivos que conforman el sistema electrónico del módulo de vibraciones; componentes como la tarjeta de adquisición, el circuito de adaptación para sensores piezoeléctricos, y la programación de los instrumentos virtuales en general, son componentes que se escogieron teniendo en cuenta parámetros de uso y previendo rangos máximos para las variables de entrada y salida del sistema, de esta forma se obtuvo un sistema robusto, sin necesidad de sobre diseñar ni aumentar la complejidad del módulo en general.

Poder determinar las frecuencias naturales de oscilación y los modos de vibración para el caso de los modelos con más de un grado de libertad, permite actualizar los modelos matemáticos creados para las edificaciones a escala, con uno de los parámetros más importante de diseño, como lo son los anteriormente nombrados; esto se realiza gracias al análisis de espectros de frecuencia que se han programado en labview, para realizar un análisis

más detallado de la composición de cada una de las señales de aceleración provenientes de los dispositivos instalados en los modelos.

Los ensayos descritos en los numerales 11.1 y 11.2, buscan determinar por dos métodos diferentes los periodos naturales y los modos de vibración de los modelos ensayados; el primer método busca determinar los periodos de vibración mediante el análisis de Fourier realizado a las señales de aceleración provenientes de una prueba de movimiento libre amortiguado; el segundo realiza un barrido de frecuencias, buscando poner en resonancia el modelo, al replicar con el shaker una frecuencia igual o muy cercana a la fundamental, o a alguno de los modos del sistema; que los resultados de ambos ensayos hayan sido prácticamente iguales corrobora el buen funcionamiento de las etapas de adquisición y procesamiento de datos, junto con la de generación y control del shaker, ya que el primer ensayo utiliza únicamente el sistema de adquisición de datos, mientras el segundo solo utiliza el sistema de control del shaker 2075e.

En los numerales 11.3.1 y 11.3.2, se determina el módulo de elasticidad de los materiales que conforman el set de estructuras Pasco, mediante un ensayo estático y uno dinámico respectivamente, esto se hizo con el fin de demostrar que las propiedades mecánicas de los materiales, rigen la estática y la dinámica de los diferentes sistemas que se modelan con dichos materiales, en la zona elástica del material. Para el ensayo estático con el que se determinó el módulo de elasticidad, midiendo las deformaciones verticales de una viga simplemente apoyada, se obtuvo un  $E=4403,80\text{MPa}$ ; por otra parte, con la prueba dinámica, sobre un sistema de un grado de libertad construido con las mismas piezas evaluadas en la prueba estática, se determinó con la ayuda del dato experimental de la frecuencia fundamental del sistema, que el  $E=4684,03\text{MPa}$ ; a pesar de que los resultados no fueron idénticos, la prueba se considera exitosa debido a la proximidad de los valores, y se justifica la corta diferencia entre los resultados por causa de que la longitud efectiva de los elementos en la prueba dinámica supone alguna incertidumbre debido a que se desconoce el funcionamiento del nodo donde convergen las columnas y vigas del modelo a escala.

### **13. RECOMENDACIONES.**

La implementación del laboratorio de dinámica estructural, permitirá realizar gran número de proyectos de investigación y trabajos de grado que tengan como objetivo realizar aportes al campo de la dinámica de estructuras; por esto es necesario promover el uso del equipo en el campo académico, para fortalecer el interés de los estudiantes en este tema en particular, que sin duda es de gran importancia en la ingeniería civil del país.

El desarrollo de este prototipo, permite la modelación teórica y experimental, de gran número de sistemas estructurales de pequeña escala, pero se plantea la necesidad de desarrollar un proyecto de más envergadura, que basado en los adelantos realizados por medio de este proyecto, permita crear un sistema de gran potencia, en el que se pueda probar sistemas estructurales reales, bajo condiciones de vibración controladas.

Es necesario seguir fortaleciendo el Hardware y los sistemas electrónicos del laboratorio de dinámica estructural, adquiriendo sensores de mayor sensibilidad, y manteniendo actualizados, los instrumentos virtuales y el desarrollo de nuevos instrumentos, que se vayan adaptando a las necesidades de las investigaciones que aquí se realicen.

Se recomienda al laboratorio de ingeniería civil, que desarrolle el módulo de soporte de las estructuras, diseñado en este proyecto de grado, para que los errores inducidos en la modelación, respecto a las amplitudes, sean mínimos.

Con la ayuda de ingenieros mecánicos, un implementar un nuevo prototipo de la plataforma móvil, que facilite la adaptación de más instrumentos de medición, y agilice la realización de ensayos en la mesa.

## 14. Bibliografía

Anil K. Chopra; Dinámica de estructuras, teoría y aplicaciones, (4ta edición)  
Editorial Pearson

Claudia P. Retamoso Llamas, Tito L. Fernández Báez ejemplo de utilización del programa ANEST 3D en análisis de estructuras en tres dimensiones (estructura constituida por pórticos). Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

Gerardo E. Aguilar y Paola G. Melenez Análisis y diseño de modelos estructurales para ensayos en mesa vibratoria educativa. Trabajo de grado (Octubre del 2009 – Universidad Centro Americana “José Simeón Cañas”)

Gustavo A. Vargas, José E. Venegas y Peter Thomson. Diseño y construcción del simulador sísmico Uniaxial de la universidad del valle. Revista de ingeniería Uniandes Volumen 12. Páginas De las 55 a 58.

Hoja de datos acelerómetros Ac233 series, CTC Conection Technology Center, New York USA, 2014

Hoja de datos para el integrado LM334, Texas Instruments, Dallas Texas USA, 2014

Manual técnico para las DAQ 9234, National Instruments, 2008

Manual técnico para las DAQ SERIE X, National Instruments, 2009

Manual técnico Shaker 2075e, The modal shop, Cincinnati USA , 2010

Marcelo Romo Proaño, técnicas para la generación de diagramas de velocidades y diagramas de desplazamiento a partir de acelerogramas sísmicos, Centro de Investigaciones científicas, escuela politécnica del ejército.

Mesa Vibradora ALPU. Internet: <http://www.miningmachinechina.es/3-6-shaking-table.html>, Oct. 25, 2000, consultado [Nov. 3, 2012].

Nicola Tarque Ruiz, Cesar Loaiza Fuentes; XVI curso internacional de estructuras, Análisis sísmico de edificios, Pontificia universidad católica de Perú, Octubre 2003

Víctor J. Pimentel Trujillo. Construcción de una mesa vibratoria para simular sismos en una dirección. Trabajo de grado (Enero del 2001 – Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga)

## **15. Anexo A. Manual de operación del módulo de vibraciones.**

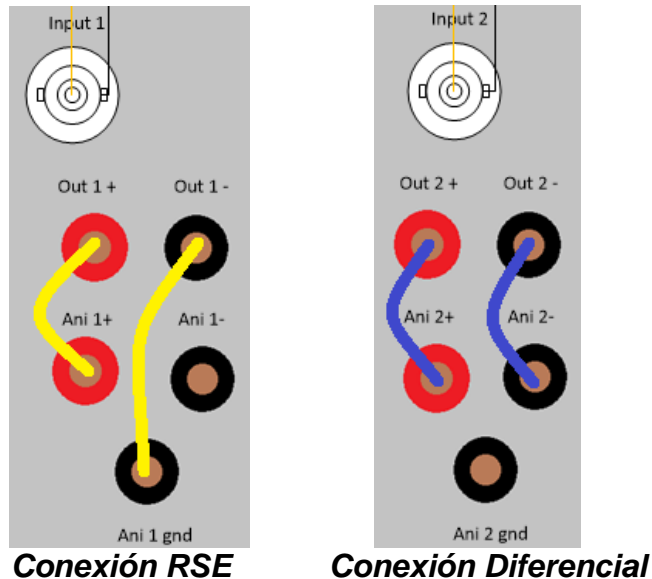
En este anexo, incorporan los pasos a seguir para realizar satisfactoriamente una gran diversidad de pruebas y ensayos sobre modelos a escala o materiales elásticos, empleando el módulo de vibraciones.

### ***A. Iniciar el módulo de vibraciones.***

1. Conecte los cables de poder de, la DAQ 6341, el Smart AMP y la fuente de alimentación de 24v DC, incrustada en el panel de control,
2. Encienda el SmartAmp, la Daq 6341 y el pc; si están energizados los equipos, en el panel de control se encenderá un led azul, indicando que la tarjeta de adquisición está encendida; igualmente se encenderá un led de color verde en la fuente de poder, indicando que ha sido energizada.
3. Asegúrese de que la perilla de ganancia del SmartAmp se encuentre bloqueada completamente hacia la izquierda (mute), de esta manera se puede proceder a iniciar los instrumentos virtuales.
4. No manipule el sistema durante 1 minuto, tiempo requerido para la inicialización del SmartAmp y de los filtros físicos dentro del panel de control.

### ***B. Conectar los acelerómetros piezoeléctricos al panel de control y adquisición.***

1. El panel de adquisición y control cuenta con 4 entradas analógicas para sensores de aceleración piezoeléctricos, Elija cual o cuales canales usara y conecte la perilla BNC macho de los acelerómetros a la entrada BNC hembra del panel de control (basta con girar suavemente)
2. Conectados los acelerómetros, proceda a puentear con los conectores banana, la salida del sensor, con los terminales de entrada de la DAQ. Esto depende de la forma como desee configurar la adquisición, Existen dos formas posibles; Tipo RSE, Tipo DIFERENCIAL; a continuación hay un par de ejemplos para cada caso.



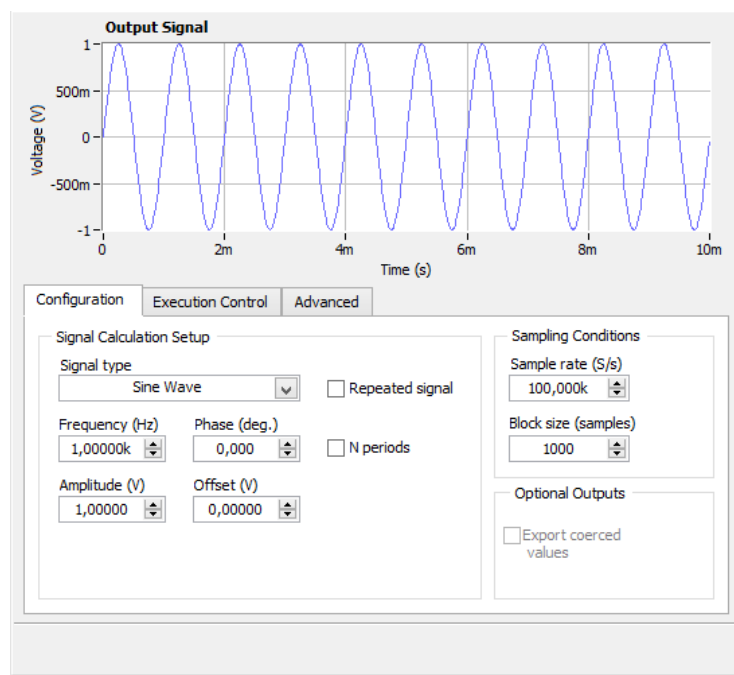
El modo RSE es el modo de uso común, úselo en la mayoría de los casos.

El modo diferencial, exige un poco más a la DAQ 6341, pero permite un mejor rechazo al ruido, Úselo si se requieren pocos canales y los valores de voltaje esperados son menores a los 500mv (1 gravedad).

**C. Configuración del canal de salida y generación de señal de excitación, usando Labview, SignalExpress**

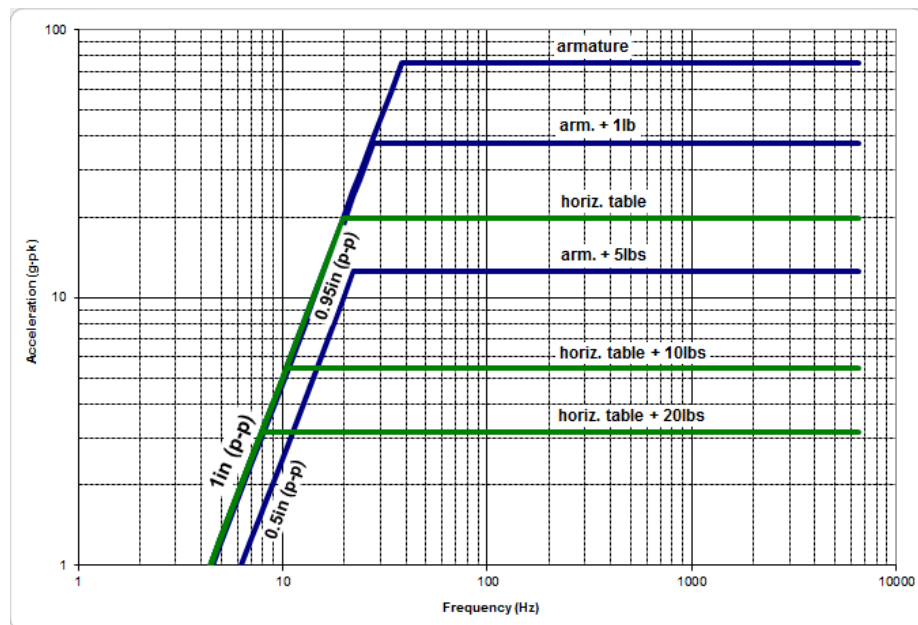
1. Si va a usar el software propio del módulo de vibraciones, salte estos indicativos. C y D.
2. Inicie Labview SignalXpress desde -menú de inicio-todos los programas-labview-SignalXpress.
3. Verifique que la tarjeta de adquisición DAQ-6341 ya está encendida.
4. Para configurar un canal para la generación de señales (Esta señal hará vibrar el shaker), de click en **Add step**, se abrirá un menú con las acciones que son posibles realizar mediante este software.
5. Despliegue la pestaña **Generate signal**, a continuación despliegue la pestaña **DAQmx Generate**, despliegue la pestaña **Analog Output**, y por ultimo seleccione la opción **Voltage**.
6. Se desplegara una pestaña con los canales físicos que la DAQ ofrece para generar la señal, seleccione **Analog Output 0 (Ao0)**.

7. Asegúrese que en las casillas de valor de salida máximo y valor de salida mínimo, se encuentren los valores +5 para la máxima y -5 para la mínima.
8. ponga la configuración del canal en el modo **RSE**, y verifique que en la parte inferior del recuadro, un icono en forma de reloj se encuentre chuleado. Siguiendo estos pasos ya habrá configurado el canal de salida para la DAQ-6341.
9. Ahora se debe crear la señal que se enviara por el canal ya configurado. Para esto vuelva a dar clic en el botón **Add step**, despliegue la pestaña **créate signal**, y por ultimo seleccione la opción, **create analog signal**.
10. Se ha abierto el recuadro para la creación de señal análoga, como opciones para el tipo de señal a crear, puede escoger Señal sinusoidal, señal de ruido, multitono y formula; los demás tipos posibles no se deben usar para realizar ensayos, debido a que le exigen al shaker cambio bruscos de posición o picos de aceleración, que pueden dañar el equipo.



***Ventana de configuración de señal.***

11. Elija las propiedades de su señal, como amplitud puede usar siempre el valor de 1V, varié la frecuencia de su simulación al valor de frecuencia que desee reproducir en la mesa de vibración, tenga en cuenta que la frecuencia de la simulación no debe ser muy grande, aunque el shaker puede reproducir señales de Hasta 6.5KHz, debido a la masa de los modelos y de la propia mesa, esta frecuencia se debe reducir para evitar recalentamientos en el dispositivo; siempre tenga en cuenta los valores máximos de aceleración que puede alcanzar según el peso de los modelos, tenga en cuenta la tabla de aceleración vs frecuencia que se muestra a continuación.



**Curvas aceleración vs frecuencia**

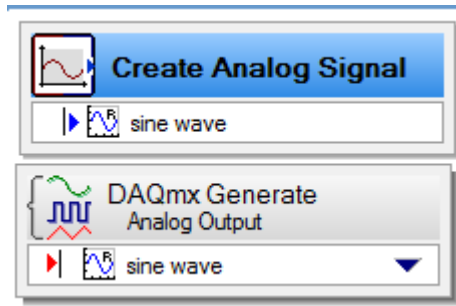
12. Por último elija la frecuencia de muestreo y el tamaño del bloque de transmisión de la señal, tenga en cuenta que la frecuencia de muestreo debe ser mucho mayor a la frecuencia más alta presente en la señal, o a la misma frecuencia de la señal en el caso de querer reproducir una onda sinusoidal. A continuación se muestra un ejemplo.

Para señales con frecuencias entre  $1\text{Hz} < F_s < 10\text{Hz}$  use un frecuencia de muestreo de 1kHz o 2kHz

Para señales con frecuencias entre  $10\text{Hz} < F_s < 100\text{Hz}$  use frecuencia de muestreo entre 2KHz y 10KHz

Para frecuencias mayores a 100Hz utilice una frecuencia 100 veces la frecuencia de la señal y aproxímela al múltiplo de 1000 siguiente  
Por ejemplo para 200Hz = 20KHz

13. Para definir el tamaño del bloque, use entre 3 o 5 veces la magnitud de la frecuencia de muestreo de la señal, por ejemplo si se usa una frecuencia de muestreo de 1KHz, puede usar un tamaño del bloque entre 3000 y 5000 muestras.
14. Una vez creados la señal y el canal de salida, se deben enlazar; en el recuadro de steps al lado izquierdo de la pantalla, de click sostenido en el bloque de la señal que acaba de crear y arrástrela sobre el bloque de configuración del canal. Obtendrá un cuadro de configuración como el que se muestra a continuación.



**Canal y señal de salida enlazados**

15. Por ultimo presione el botón RUN, y empiece a variar suavemente la perilla de ganancia del SmartAmp, note como el shaker empieza a vibrar.

***D. Configuración del canal de adquisición de datos para los sensores de aceleración, usando Labview SignalXpress.***

1. Para configurar un canal para la adquisición de señales (proveniente de los acelerómetros), de clic en **Add step**, se abrirá un menú con las acciones que son posibles realizar mediante este software.

2. Despliegue la pestaña **Acquire Signal**, a continuación despliegue la pestaña **DAQmx Acquire**, despliegue la pestaña **Analog input**, y por ultimo seleccione la opción **Voltage**.
3. Se desplegara una pestaña donde se muestran los canales físicos de entrada que ofrece la DAQ-6341; para saber cuál elegir, tenga en cuenta donde conecto el sensor piezoeléctrico en el panel de control y adquisición.



**Conexiones de entrada**

Si usa input 1, configure el canal de entrada **Analog Input 0 (Ai0)**

Si usa input 2, configure el canal de entrada **Analog Input 1 (Ai1)**

Si usa input 3, configure el canal de entrada **Analog Input 2 (Ai2)**

Si usa input 4, configure el canal de entrada **Analog Input 3 (Ai3)**

4. En el mismo cuadro de selección del canal de entrada, configure el canal como RSE o DIFERENCIAL según el tipo de conexión que haya realizado en el panel.
5. Se abrirá el cuadro de configuración del canal, asegúrese de que en los cuadro de voltaje máximo y mínimo, se encuentren los valores +10v para el máximo, y -10v para el mínimo.
6. En el cuadro de modo de adquisición, escoja **Muestras continuas** y elija una frecuencia de muestreo; el criterio para seleccionar la frecuencia de muestreo en adquisición es similar al aplicado en generación, pero se aplica a las frecuencias esperadas para las vibraciones que transmitirá el acelerómetro. Para ensayos normales, con frecuencias de entrada no superiores a los 100Hz, puede usar frecuencias de muestreo entro 1Ks/s hasta 10Ks/s
7. El tamaño del bloque de transmisión puede ser 3 o 5 veces la magnitud de la frecuencia de muestro.

Si usa una frecuencia de muestreo de 1ks/s puede usar un bloque con un tamaño entre 3000 y 5000 muestras

8. Ya configurado el canal de adquisición, de clic en el botón RUN. Empezara a observar la respuesta del acelerómetro en pantalla.

**Nota:** es posible, solo adquirir datos, solo generar datos, o hacer ambos procesos a la vez; simplemente configure los bloques que necesite, o de clic derecho sobre los que no necesita y de la opción **Borrar**.

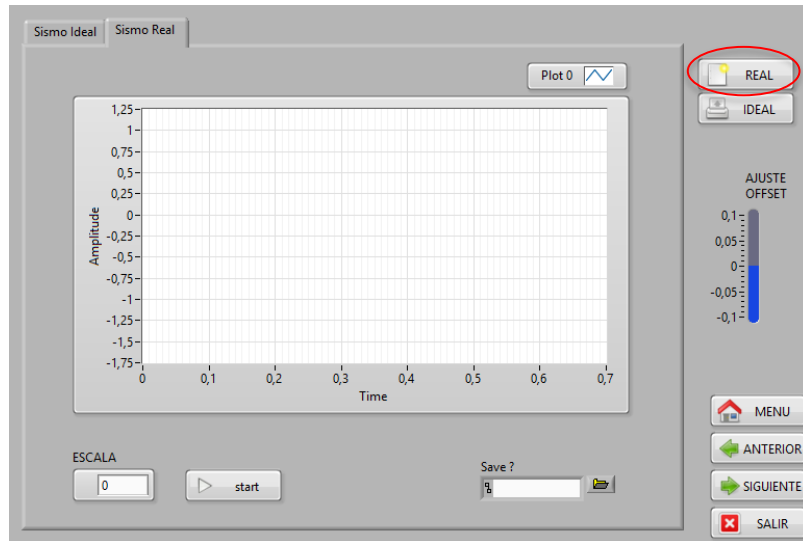
**E. Realizar ensayos de vibración, usando el instrumento virtual desarrollado en Labview.**

1. Inicie el software para el módulo de vibraciones y presione **RUN**.
2. En el menú de inicio presione el botón **Importar datos**, el programa mostrara el menú importar. Si desea simular señales armónicas, en el menú de inicio vaya directamente a **configuración**, y salte los numerales 3,4,5,6,7,8 y 10.
3. En este menú puede importar los acelerogramas previamente guardados en formatos Xls (Excel), primero abra el archivo de Excel y verifique que en la primera columna del archivo se encuentren los puntos de tiempo del diagrama, y en la segunda se encuentren los pares de datos de aceleración.

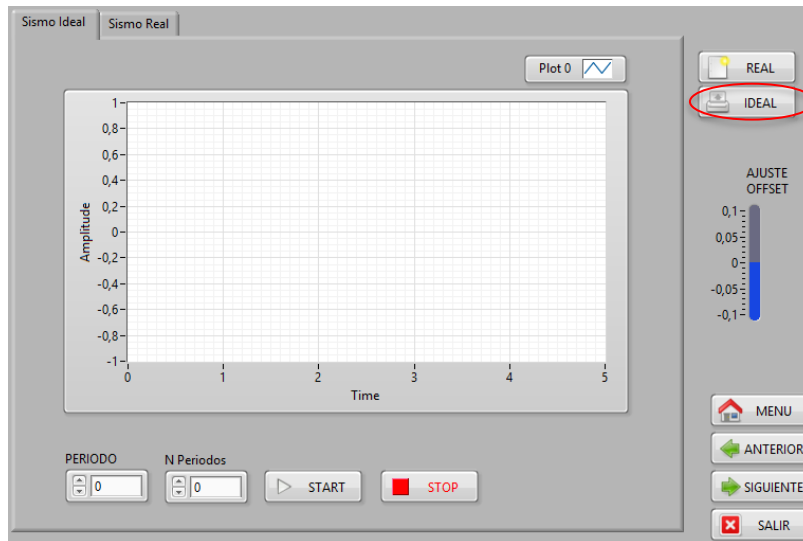
	A	B
1	0	0
2	0,05	2
3	0,1	-3
4	0,15	0
5	0,2	0
6	0,25	5
7	0,3	0
8	0,35	-5
9	0,4	Aceleración
10	0,45	1
11	0,5	0
12	0,55	-6
13	0,6	0
14	0,65	1
15		

**Acelerograma en Excel**

4. Escriba las coordenadas de la primera celda de entrada, que para el ejemplo es la celda con coordenadas, Columna 1 – Fila 1, y después coloque las coordenada de la celda de salida, que para el ejemplo tiene las coordenada Columna 2 – Fila 14.
5. Haga clic en **importar** y seleccione el archivo de Excel de interés; una vez seleccionado el archivo, los datos son importados a Labview; de clic en **siguiente**.
6. El programa ha saltado al menú **aceleración T**, defina el número de puntos que desea que el programa interpole para un segundo de la señal, esto depende de la frecuencia del acelerograma o la diferencia en tiempo entre pares de datos. Para acelerogramas promedios, se recomienda usar valores en 1000 y 5000, de clic en **Start**, el Vi reconstruirá el acelerograma en labview. De clic en **siguiente**.
7. El programa ha saltado al menú **velocidad T**. oprima **start**, y el Vi realizara la primera integración numérica del acelerograma para encontrar matriz de velocidades del terreno. De clic en **siguiente**.
8. El programa ha saltado al menú **Desplazamiento T**. oprima **start**, y el Vi realizara la segunda integración numérica del acelerograma para encontrar la matriz de desplazamientos del terreno. De clic en **siguiente**.
9. Una vez en el menú configuración, escoja el canal de salida como **Analog output 0 (Ao0)**, y el canal de entrada siguiendo con el criterio mostrado en el inciso D.3. Seguido de clic en **configurar**, después de clic en **siguiente**.
10. Ya en el panel de simulación, de clic en **REAL**, ajuste la **escala** de la onda obtenida, haciendo que los valores picos sean cercanos a 1 o -1; a continuación elija un fichero para almacenar los datos capturados por el acelerograma y de clic en **Start**.
11. Si desea realizar la simulación de un armónico, de clic en **ideal** y elija el periodo de la señal que desea simular; después de clic en **start**.
12. Varié lentamente la ganancia del SmartAmp y note como el shaker reproduce el sismo importado a Labview.



**Panel para simulación Real.**



**Panel para simulación Ideal.**

**16. Anexo B. Calculo de la rigidez del modelo de estudio, en sentido del eje Y**

Área =	5,17418E-05	m2		Área =	0,00002886	m2
L =	0,14	m		L =	0,18	m
c =	1			c =	0	
s =	0			s =	1	
ro =	2,52227E-07	E		ro =	5,08093E-08	E
beta =	1465,282763			beta =	3155,58802	
Viga 1y-1y				Columna 1y-1y		

Factores

0,000369585	0	0	-0,00036958	0	0	E
0	3,02673E-06	2,11871E-07	0	-3,02673E-06	2,11871E-07	
0	2,11871E-07	1,97746E-08	0	-2,11871E-07	9,88732E-09	
-0,00036958	0	0	0,000369585	0	0	
0	-3,02673E-06	-2,11871E-07	0	3,02673E-06	-2,11871E-07	
0	2,11871E-07	9,88732E-09	0	-2,11871E-07	1,97746E-08	

Rigidez viga, pórtico 1y-1y

6,09712E-07	0	5,48741E-08	-6,0971E-07	0	5,48741E-08	E
0	0,00016033	0	0	-0,00016033	0	
5,48741E-08	0	6,58489E-09	-5,4874E-08	0	3,29245E-09	
-6,0971E-07	0	-5,4874E-08	6,09712E-07	0	-5,4874E-08	
0	-0,0001603	0	0	0,000160333	0	
5,48741E-08	0	3,29245E-09	-5,4874E-08	0	6,58489E-09	

Rigidez columna, pórtico 1y-1y

0,000370194	0	5,48741E-08	-0,00036958	0	0	E
0	0,00016336	2,11871E-07	0	-3,02673E-06	2,11871E-07	
5,48741E-08	2,11871E-07	2,63595E-08	0	-2,11871E-07	9,88732E-09	
-0,00036958	0	0	0,000370194	0	5,48741E-08	
0	-3,02673E-06	-2,11871E-07	0	0,00016336	-2,11871E-07	
0	2,11871E-07	9,88732E-09	5,48741E-08	-2,11871E-07	2,63595E-08	

Matriz de rigidez global del pórtico 1y-1y

$K=1,05328E-06 \cdot E$   
RIGIDEZ DEL PORTICO 1y-1y

$K=2,10655E-06$   
RIGIDEZ DEL SISTEMA (eje Y)=

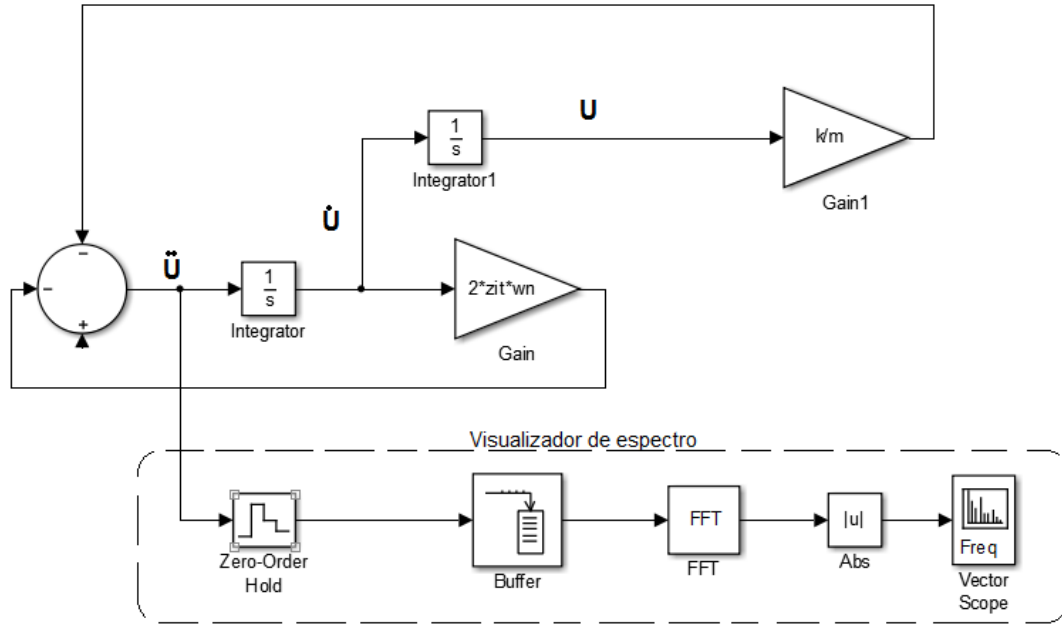
**17. Anexo C. Simulación del modelo matemático en, simulink.**

Factor	Descripción	Valor
F	Frecuencia fundamental en Hz	3.2
T	Periodo fundamental en S.	0.3125
Wn	Frecuencia angular en Rad/seg	20.10
Zit	Constante de amortiguamiento	0.06
C	Amortiguamiento viscoso	0.0020
Cr	Amortiguamiento critico	0.0336
Masa	Masa en Mg	0.000848
K	Rigidez en KN/m	0.342

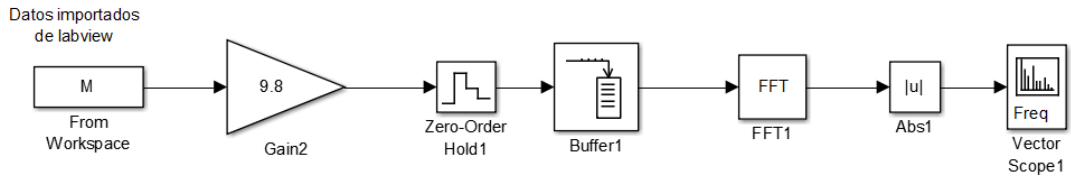
**Factores del ensayo dinámico**

$$\ddot{U} + 2 * zit * Wn * \dot{U} + \frac{K}{m} * U = 0$$

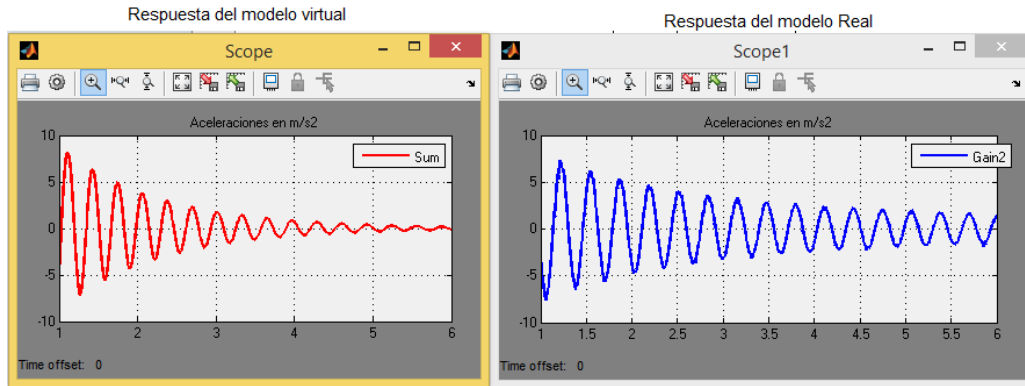
**Ecuación diferencial característica del sistema**



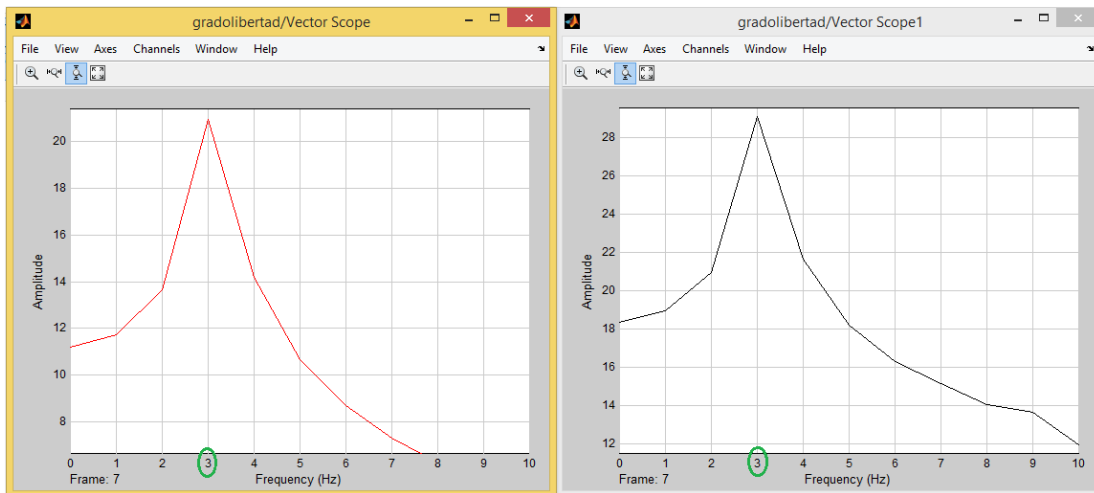
**Diagrama de bloques del modelo, en simulink**



**Visualizador de espectro, para los datos experimentales.**



**Respuesta modelo virtual, vs modelo real**



**Respuesta espectral, Modelo virtual, vs Modelo real**