

**ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA
PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS**

**NICOLÁS ESTEBAN DAZA GONZÁLEZ
YULWARD ANDRES FRAGOZO LIÑAN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2018

**ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA
PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS**

**NICOLÁS ESTEBAN DAZA GONZÁLEZ
YULWARD ANDRES FRAGOZO LIÑAN**

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico

M.Sc. Alex Alberto Monclou Salcedo

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2018

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, junio de 2018

Dedicaciones primeramente a Dios, a nuestras familias por su apoyo y a nuestros profesores por su acompañamiento que ayudó al cumplimiento de esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este trabajo de grado queremos agradecer primeramente a Dios por permitirnos cumplir con esta meta, a nuestros padres Nicolás Daza, Claudia González, Edward Fragozo, Julia Liñan y destacar también al Ingeniero Msc. Alex Alberto Monclou Salcedo por su apoyo incondicional y acompañamiento a lo largo de nuestro pregrado y durante la construcción de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1.	MARCO TEÓRICO.....	1
1.1	ONDAS MECÁNICAS	1
1.1.1	ONDAS DE CUERPO.....	1
1.1.2	ONDAS P..	2
1.1.3	ONDAS S	2
1.2	CONCEPTOS BÁSICOS DE MÉTODOS SÍSMICOS.....	3
1.2.1	SÍSMICA DE REFRACCIÓN.....	4
1.2.2	SÍSMICA DE REFLEXIÓN.....	5
1.2.3	GEOFÓNOS.....	6
1.3	ACELERÓMETROS.....	6
1.3.1	TIPOS DE ACELERÓMETROS.....	7
1.3.1.1	ACELERÓMETROS MECÁNICOS.....	8
1.3.1.2	ACELERÓMETROS PIEZOELÉCTRICOS.....	8
1.3.1.3	ACELERÓMETROS PIEZORRESISTIVOS.....	9
1.3.1.4	ACELERÓMETROS MICROMECAÑICOS (MEMS).....	9
1.3.1.5	ACELERÓMETROS CAPACITIVOS.....	11
1.3.2	SENSOR <i>SILICON DESIGNS</i> 2012.....	11
1.4	TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI USB-9234, cDAQ-9171.....	12
1.5	<i>SIGNALEXPRESS</i> DE <i>LABVIEW</i>	13
2.	METODOLOGÍA	13
2.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN	14
2.2	INSTRUMENTOS.....	14
2.3	PROCEDIMIENTO	14
2.3.1	Observación de las características y modos de propagación de las ondas mecánicas	14
2.3.2	Caracterización y adaptación del comportamiento de los acelerómetros para su uso en el estudio de propagación de ondas	15
2.3.3	Estudio e instalación de la tarjeta de adquisición de datos para la recepción de las señales de los acelerómetros.....	18
2.3.4	Adecuación de una herramienta software para la captura de las señales generadas	20
2.3.5	Ensayos para la adquisición y almacenamientos de datos.....	26
2.3.5.1	ARREGLO EN LABORATORIO DE COMUNICACIONES K-309	26
2.3.5.2	ARREGLO EN LABORATORIO DE MÁQUINAS K-102	35
2.3.5.3	ARREGLO EN CAMPO.....	42
2.3.5.4	ARREGLO PARA CAPTAR SEÑAL CON ECXITACIÓN PERPENDICULAR Y LATERAL.....	50
3.	CONCLUSIONES	54
4.	BIBLIOGRAFÍA	55
5.	ANEXOS.....	57
	ANEXO 1: <i>Datasheet Model</i> 2012.....	57
	ANEXO 2: Calibración de acelerómetros SDI.....	60
	ANEXO 3: Manual de prácticas para laboratorio	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ondas Longitudinales.	2
Figura 2. Ondas transversales.	3
Figura 3. Ley de Snell, reflexión y refracción de una onda.....	4
Figura 4. Sísmica de Refracción.....	5
Figura 5. Sísmica de Refracción.....	5
Figura 6. (a) Geófono (b) Estructura interna del geófono.....	6
Figura 7. Esquema Acelerómetro Mecánico.....	8
Figura 8. Diagrama de un acelerómetro piezoeléctrico.....	8
Figura 9. Diagrama de un acelerómetro piezorresistivo.....	9
Figura 10. Esquemático del interior de un Acelerómetro MEMS.....	10
Figura 11. Esquemático funcionamiento Acelerómetro Hitachi.....	10
Figura 12. Esquema del principio de funcionamiento de un acelerómetro de condensador.	11
Figura 13. Sensor 2012 Silicon Designs.....	11
Figura 14. Comportamiento del acelerómetro 2012.....	12
Figura 15. NI USB-9234.....	12
Figura 16. cDAQ 9171.....	12
Figura 17. Verificación del voltaje AOP +g.....	15
Figura 18. Verificación del voltaje AOP -g.....	16
Figura 19. Salida AOP en operación simple según Fabricante.....	17
Figura 20. Salida AOP calculada 2012-005.....	18
Figura 21. Salida AOP calculada 2010-010.....	18
Figura 22. Estructura interna para un canal del módulo de entrada de sonido y vibración NI 9234.....	19
Figura 23. Modulo fuente y borneras I/O para los acelerómetros.....	20
Figura 24. Esquema de conexión del sistema.....	20
Figura 25. Ventana de inicio de SignalExpress.....	21
Figura 26. Elementos de la ventana principal de SignalExpress.....	21
Figura 27. Selección de la tarjeta a utilizar.....	22
Figura 28. Configuración de los canales a utilizar.....	23
Figura 29. Ventana de visualización de datos.....	23
Figura 30. Incorporación de señales.....	23
Figura 31. Menú Run.....	24
Figura 32. Ventana de configuración de Run.....	24
Figura 33. Selección de señales a grabar.....	24
Figura 34. Ventana de datos registrados.....	25
Figura 35. Señal guardada en el canal 0.....	25
Figura 36. Análisis de señal.....	26
Figura 37. Arreglo lineal de cuatro acelerómetros desarrollado en los experimentos.....	26
Figura 38. Golpe A, primer experimento.....	28
Figura 39. Señales del golpe A, primer experimento.....	28
Figura 40. Golpe B, Primer experimento.....	29

Figura 41. Señales del golpe B, primer experimento.....	29
Figura 42. Golpe C, Primer experimento.....	30
Figura 43. Señales del golpe C, primer experimento.....	30
Figura 44. Golpe D, Primer experimento.....	31
Figura 45. Señales del golpe D, primer experimento.....	31
Figura 46. Golpe E, Primer experimento.....	32
Figura 47. Señales del golpe E, primer experimento.....	32
Figura 48. Golpe F, Primer experimento.....	33
Figura 49. Señales del golpe F, primer experimento.....	33
Figura 50. Todos los golpes captados por el sensor 1, primer experimento.....	34
Figura 51. Señales captadas por sensor 1, primer experimento.....	34
Figura 52. Golpe A, segundo experimento.....	36
Figura 53. Señales del golpe A, segundo experimento.....	36
Figura 54. Golpe B, segundo experimento.....	37
Figura 55. Señales del golpe B, segundo experimento.....	37
Figura 56. Golpe C, segundo experimento.....	38
Figura 57. Señales del golpe C, segundo experimento.....	38
Figura 58. Golpe D, segundo experimento.....	39
Figura 59. Señales del golpe D, segundo experimento.....	39
Figura 60. Golpe E, segundo experimento.....	40
Figura 61. Señales del golpe E segundo experimento.....	40
Figura 62. Golpe F, segundo experimento.....	41
Figura 63. Señales del golpe F, segundo experimento.....	41
Figura 64. Golpe A, tercer experimento.....	44
Figura 65. Señales del golpe A, tercer experimento.....	44
Figura 66. Golpe B, tercer experimento.....	45
Figura 67. Señales del golpe B, tercer experimento.....	45
Figura 68 Golpe C, tercer experimento.....	46
Figura 69. Señales de golpe C, tercer experimento.....	46
Figura 70. Golpe D, tercer experimento.....	47
Figura 71. Señales del golpe D, tercer experimento.....	47
Figura 72. Golpe E, tercer experimento.....	48
Figura 73. Señales del golpe E, tercer experimento.....	48
Figura 74. Golpe F, tercer experimento.....	49
Figura 75. Señales del golpe F, tercer experimento.....	49
Figura 76. Golpe A, cuarto experimento.....	50
Figura 77. Señal del sensor 1 del golpe A (perpendicular), cuarto experimento.....	50
Figura 78. Señal del sensor 2 del golpe A (perpendicular), cuarto experimento.....	50
Figura 79. Señal del sensor 1 del golpe A (lateral), cuarto experimento.....	50
Figura 80. Señal del sensor 2 del golpe A (lateral), cuarto experimento.....	50
Figura 81. Señales de acelerómetros.....	52
Figura 82. Señales de geófonos.....	52

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones Modelo 2012.	16
Tabla 2. Convenciones terminales SDI 2012.	19

GLOSARIO

ACELERÓMETRO: Un acelerómetro es un dispositivo que mide la vibración o la aceleración del movimiento de una estructura.

ARREGLO: Orden y ubicación de acelerómetros y puntos de golpe para experimentos.

CARACTERIZACIÓN: Es una descripción cualitativa que puede recurrir a datos o a lo cuantitativo con el fin de profundizar el conocimiento sobre algo.

FUENTE: Dispositivo que convierte la corriente alterna, en una o varias corrientes continuas, que alimentan los distintos circuitos del aparato electrónico al que se conecta.

GOLPE: acción para generar ondas, a partir de perturbaciones en el suelo con un martillo.

HARDWARE: Conjunto de elementos físicos o materiales que constituyen una computadora o un sistema informático.

ONDAS: consiste en la propagación de una perturbación de alguna propiedad del espacio, implica un transporte de energía sin transporte de materia.

PERTURBACIÓN: Es la variación de una magnitud física respecto a un determinado valor que se considera estacionario o de equilibrio.

REFLEXIÓN: Cambio de dirección o de sentido de una onda, sea de luz, calor o sonido cuando se les interpone un obstáculo.

REFRACCIÓN: Cambio de dirección de una onda sea de sonido, luz u otra radiación que se produce al pasar oblicuamente de un medio a otro de distinta densidad.

SENSOR: Dispositivo que capta magnitudes físicas (variaciones de luz, temperatura, sonido, etc.) u otras alteraciones de su entorno.

SOFTWARE: Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS

AUTOR(ES): NICOLÁS ESTEBAN DAZA GONZÁLEZ
YULWARD ANDRES FRAGOZO LIÑAN

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): ALEX ALBERTO MONCLOU SALCEDO

RESUMEN

Buscando la integración de las ciencias básicas aplicadas a la ingeniería, para el caso de las ondas mecánicas se planeó y se implementó un módulo con aplicaciones hardware y software tal que permite estudiar la propagación de las ondas transversales y longitudinales y proyectar su aplicación a los métodos sísmicos de prospección geofísica, los cuales se fundamentan en el estudio de la propagación de las ondas elásticas en el medio. Para realizar el estudio de este tipo de ondas, se emplearon sensores de vibración junto con una tarjeta de adquisición de datos que permitió la captura de la información. El procesamiento de la información se llevó a cabo con el Software de Registro de Datos y Medidas Interactivas SignalExpress de LabVIEW.

PALABRAS CLAVE:

Acelerómetros, tarjeta de adquisición, ondas mecánicas, reflexión, refracción, SignalExpress.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: ARRANGEMENT OF ACCELEROMETERS FOR THE BASIC STUDY OF THE PROPAGATION OF MECHANICAL WAVES.

AUTHOR(S): NICOLÁS ESTEBAN DAZA GONZÁLEZ
YULWARD ANDRES FRAGOZO LIÑAN

FACULTY: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: ALEX ALBERTO MONCLOU SALCEDO

ABSTRACT

Looking for the integration of the basic sciences applied to engineering, for the case of mechanical waves, a module was planned and implemented with hardware and software applications that allows studying the propagation of transverse and longitudinal waves and projecting their application to the methods seismic geophysical prospecting, which are based on the study of the propagation of elastic waves in the middle. To carry out the study of this type of waves, vibration sensors were used together with a data acquisition card that allowed the capture of the information. The information processing was carried out with the LabVIEW Signal Express Interactive Data and Measurement Software.

KEYWORDS:

Accelerometers, acquisition card, mechanical waves, reflection, refraction, propagation, Signal Express.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Las ondas según la física se definen como la transmisión de energía sin desplazamiento de materia. Existen dos tipos principales de ondas: las mecánicas que necesitan un medio para propagarse y las electromagnéticas que no lo necesitan.¹ En el medio ambiente permanentemente se siente el efecto de las ondas y su propagación y el estudio de estas hace parte de la formación como ingeniero en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. Con el proyecto se busca resaltar la importancia de esta materia profundizando en el estudio de las ondas mecánicas en particular.

De esta forma y desde el aula, el estudiante visualizará aplicaciones industriales al adquirir conocimientos prácticos de los fenómenos mecánicos de las ondas, para posteriormente aplicarlo en temas como minería, la industria del petróleo, estudio de suelos y en general el comportamiento de las ondas en cualquier medio.

Con el proyecto se busca resaltar la importancia de la asignatura ondas profundizando en el estudio de las ondas mecánicas en particular. Teniendo en cuenta esto, nace el siguiente problema a tratar: ¿Cómo facilitar y acrecentar el interés hacia el estudio de ondas mecánicas mediante el desarrollo de un prototipo que permita observar una aplicación industrial de las mismas?

¹Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2004). Física para ciencia e ingenierías (6a ed., Vol. 1). Mexico: Thomson

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Implementar un arreglo de acelerómetros para el estudio básico de la propagación de ondas mecánicas.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Observar las características y modos de propagación de las ondas mecánicas.
- Caracterizar y adaptar el comportamiento de los acelerómetros para su uso en el estudio de propagación de ondas.
- Estudiar e instalar la tarjeta de adquisición de datos para la recepción de las señales de los acelerómetros.
- Adecuar una herramienta software para la captura de las señales generadas.
- Desarrollar ensayos de laboratorio para la adquisición y almacenamientos de datos.

1. MARCO TEÓRICO

En la actualidad es de vital importancia el uso de los productos derivados de los hidrocarburos y su aplicación en la elaboración de materiales industriales como plásticos, lubricantes, pinturas, textiles, medicinas y también para la generación de electricidad.

Es así como es conveniente adquirir de manera eficiente la mayor cantidad de hidrocarburo posible. Esto se logra con un estudio del subsuelo que contiene los yacimientos y recursos naturales que se pueden extraer. Y es allí en donde la exploración geofísica como ciencia y la sísmica como herramienta son imprescindible para lograr este fin. Colombia como país con grandes riquezas mineras debe fortalecer la formación de sus ingenieros en este aspecto para lograr un óptimo aprovechamiento en la extracción de los recursos. Esto se puede llevar a cabo con un estudio profundo de las ciencias básicas en ingeniería y su aplicación especialmente en la investigación de los fenómenos que se tratan en el estudio de las ondas mecánicas.

1.1 ONDAS MECÁNICAS

El estudio de las ondas y del movimiento ondulatorio permite describir las perturbaciones y los efectos vibratorios en los materiales cuando se le aplica una fuerza externa tal que no rebase el límite elástico del material lo cual permitirá que el mismo recupere su forma después de haber vibrado respecto a su posición de equilibrio.²

Como proceso, la onda consiste en la propagación debido a una perturbación física. La energía de deformación elástica liberada por una fuente sísmica se propaga por el subsuelo mediante ondas las cuales adoptan diversas características. Según el espacio en el que se propagan existen ondas superficiales y ondas de cuerpo.

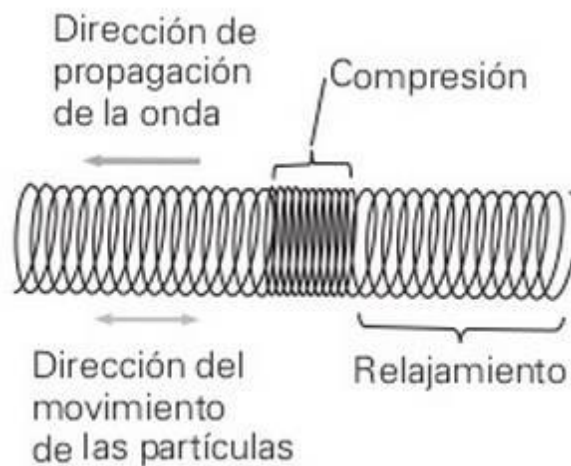
1.1.1 ONDAS DE CUERPO. Las superficiales se originan y propagan cerca de la superficie entre dos medios con propiedades elásticas diferentes, mientras que las ondas de cuerpo se propagan a través de todo el volumen de material elástico. Cuando el material del subsuelo es isótropo se propagan dos tipos de ondas de cuerpo: las ondas P y las ondas S.

² Wilson, J. D. (1991). Física con aplicaciones. México: McGraw-Hill. 1982

1.1.2 ONDAS P. Se conocen como ondas primarias, ondas irrotacionales u ondas compresionales debido a las fuerzas de compresión presentes en el medio de propagación. Como ellas presentan siempre mayor velocidad que las ondas S y que las ondas superficiales, son siempre las primeras en llegar a cualquier distancia de la fuente. En materiales isótropos las ondas P se caracterizan porque el movimiento de las partículas del suelo al paso de la onda sigue la misma dirección en que esta se propaga.³

En la figura 1. se puede detallar que en las ondas longitudinales u ondas P la dirección del movimiento de las partículas en el medio es paralela a la dirección de propagación de la onda.

Figura 1. Ondas Longitudinales.



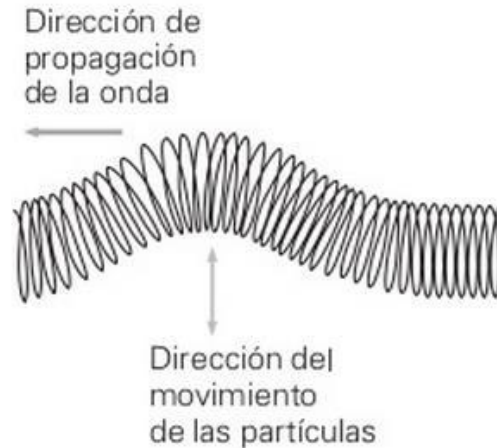
Fuente: Wilson, J. D. (1991). Física con aplicaciones. México: McGraw-Hill. 1982.

1.1.3 ONDAS S. Se conocen como ondas secundarias, ondas de corte u ondas equivolumentales. Tienen menor velocidad que las ondas P y las partículas del suelo se mueven en una dirección ortogonal a la dirección en que se propaga la onda.³

En la figura 2. se puede detallar el movimiento de la partícula del medio perpendicular a la dirección de propagación de la onda para el caso de las ondas transversales u ondas S.

³ Universidad central de Venezuela. (s.f.). Guía de prospección sísmica por refracción. Facultad de ingeniería. Escuela de minas y geofísica. Departamento de ingeniería geofísica. Disponible en: <http://www.geocities.ws/geofisicaucv/Archivos/refracc4.pdf> Citado el 29/11/2017.

Figura 2. Ondas transversales.



Fuente: Wilson, J. D. (1991). Física con aplicaciones. México: McGraw-Hill. 1982.

1.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE MÉTODOS SÍSMICOS

La exploración sísmica emplea las ondas elásticas que se propagan a través del terreno y que han sido generadas artificialmente. Su objetivo es el estudio del subsuelo en general, lo cual permite obtener información geológica de los materiales que lo conforman.

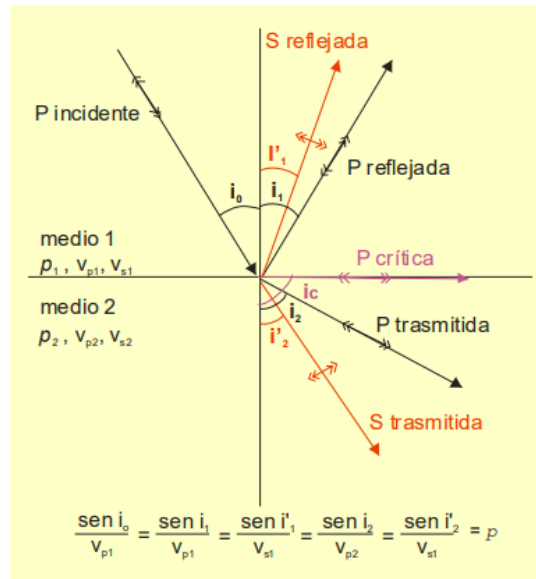
La prospección sísmica consiste en generar ondas mediante una fuente emisora y registrarlas en una serie de estaciones sensoras (geófonos) distribuidas sobre el terreno. A partir del estudio de las distintas formas de onda y sus tiempos de trayecto, se consigue obtener imágenes del subsuelo que luego se relacionan con las capas geológicas (secciones sísmicas, campos de velocidades, etc.).

Cuando una onda sísmica encuentra un cambio en las propiedades elásticas del material, como es el caso de una interfaz entre dos capas geológicas; parte de la energía continúa en el mismo medio (onda incidente), parte se refleja (ondas reflejadas) y el resto se transmite al otro medio (ondas refractadas) con cambios en la dirección de propagación, en la velocidad y en el modo de vibración.

Las leyes de la reflexión y la refracción se derivan por el principio de Huygens cuando se considera un frente de onda que incide sobre una interfaz plana. El resultado final es que ambas leyes se combinan en un único planteamiento: en una interfaz el parámetro de rayo P , debe tener el mismo valor para las ondas incidentes, reflejadas y refractadas como se muestra en la figura 3. Si el medio consta de un cierto número de capas paralelas, la ley de Snell establece que el parámetro del rayo tiene que ser el mismo para todos los rayos reflejados y refractados resultantes de un rayo inicial dado. ⁴

⁴ Métodos Sísmicos. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3404/7/41205-7.pdf>. Citado el: 05/06/2014

Figura 3. Ley de Snell, reflexión y refracción de una onda



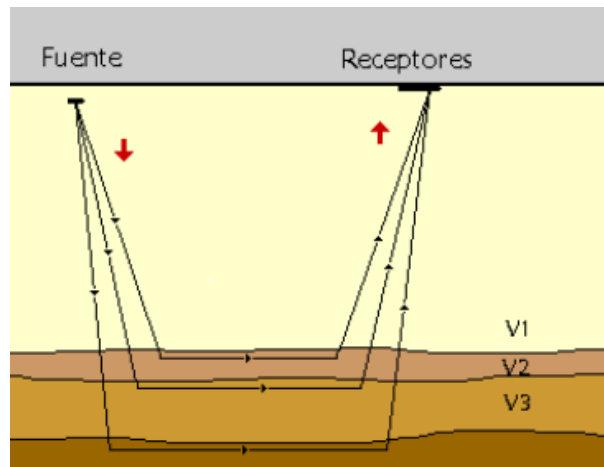
Fuente: Métodos Sísmicos. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3404/7/41205-7.pdf>. Citado el: 30/11/2017

Cuando $V_1 < V_2$, $i_0 > i_2$, los rayos se refractan por la segunda capa y los geófonos situados en la superficie no registran el fenómeno. En el caso en el que i_2 alcanza los 90° , se define como $i_1 = \text{sen}^{-1}(V_1/V_2)$ el ángulo de incidencia crítica para el cual el rayo viaja a través de la interfaz.

La ley de Snell proporciona información sobre las trayectorias de los rayos, los tiempos de llegada y la posición de los refractores, pero no proporciona información alguna sobre las amplitudes de las ondas.⁴

1.2.1 SÍSMICA DE REFRACCIÓN. El método se basa en la medición del tiempo de viaje de las ondas refractadas críticamente en las interfaces entre las capas con diferentes propiedades físicas. La energía sísmica se genera mediante un impacto controlado en superficie (o a una determinada profundidad) que va propagándose en forma de onda elástica a través del subsuelo interaccionando con las distintas capas, de manera que una parte de la energía se refleja y permanece en el mismo medio que la energía incidente y el resto se transmite al siguiente medio con un fuerte cambio de la dirección de propagación, fenómeno denominado refracción como se muestra en la figura 4.⁴

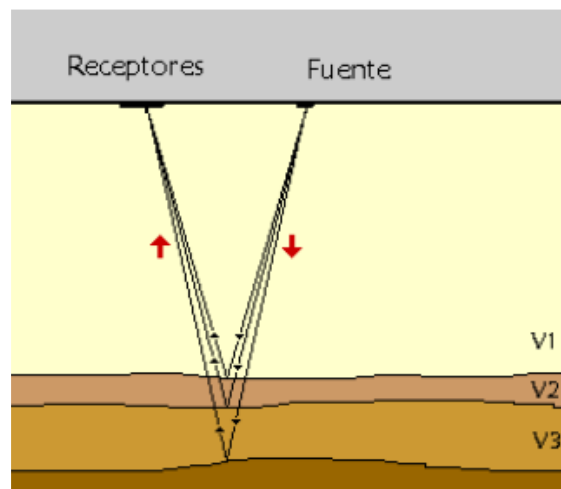
Figura 4. Sísmica de Refracción.



Fuente: Métodos Sísmicos. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3404/7/41205-7.pdf>. Citado el: 30/11/2017.

1.2.2 SÍSMICA DE REFLEXIÓN. El método sísmico de reflexión se basa en las reflexiones del frente de ondas sísmico sobre las distintas capas del subsuelo. Estas capas (reflectores) responden al igual que en la refracción, a contrastes que posteriormente se relacionaran con las distintas capas geológicas. Las reflexiones son detectadas por los receptores (geófonos) que se ubican en superficie y que están alineados con la fuente emisora. Dado que las distancias entre la fuente y los receptores son pequeñas respecto a la profundidad de penetración que se alcanza se asegura la obtención de reflexiones como se puede ver en la figura 5.⁴

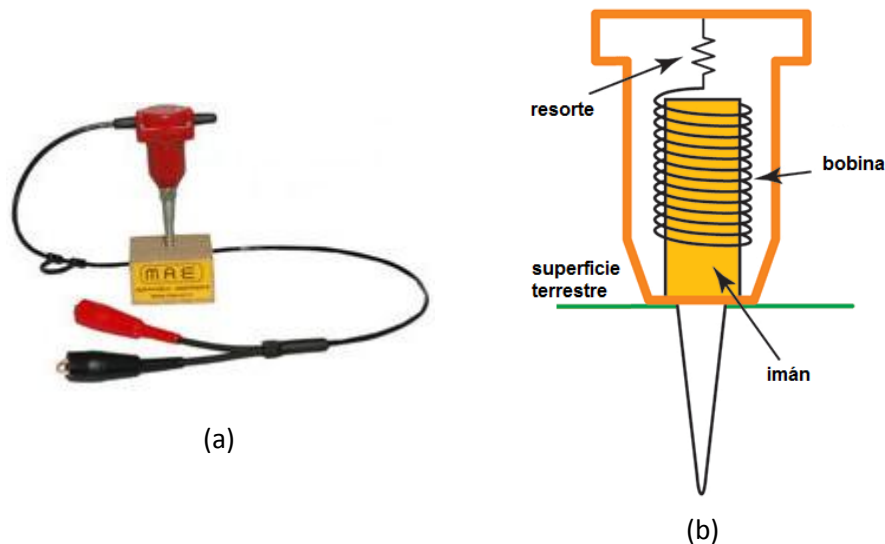
Figura 5. Sísmica de Refracción.



Fuente: Métodos Sísmicos. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3404/7/41205-7.pdf>. Citado el: 30/11/2017.

1.2.3 GEOFÓNOS. Dispositivos transductores que detectan cambio en la velocidad, en la aceleración o en el desplazamiento y transforma la vibración tanto en tierra firme como en el lecho marino y convierte el movimiento en impulsos eléctricos. Los geófonos detectan el movimiento en una sola dirección. “Los levantamientos sísmicos convencionales en tierra firme utilizan un geófono por posición de recepción para detectar el movimiento en la dirección vertical” y “los hidrófonos, a diferencia de los geófonos, detectan los cambios de presión en vez de detectar el movimiento”. Los geófonos más usados en la exploración sísmica son del tipo electromagnético como se observa en la figura 6a y 6b.⁵

Figura 6. (a) Geófono (b) Estructura interna del geófono



Fuente: El sensor sísmico: geófono. <http://ciencia.digital.info.ve/2015/05/el-sensor-sismico-geofono.html>
Citado el: 01/03/2018

1.3 ACCELERÓMETROS

Dispositivo electromecánico desarrollado para medir aceleraciones y es útil para sensar las vibraciones y el movimiento en diferentes sistemas en el caso de los vehículos en donde activa las bolsas de aire para protección del usuario, en cinturones de seguridad o en dispositivos móviles para aplicaciones de orientación y rotación de pantalla. También se usa en exploración sísmica, navegación, para detectar eventos vulcanológicos, vigilancia de las vibraciones de máquinas industriales, sistemas de estabilización de imágenes para cámaras y muchos más.⁶

⁵ Geofono. <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/g/geophone.aspx> Citado el: 01/03/2018

⁶ Agustín Leobardo Herrera May, Á. R. (mayo-agosto de 2009). Microacelerómetros para la industria automotriz. La ciencia y el hombre: REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DE LA UNIVERSIDAD VERACRUZANA, XXII (2). Obtenido de <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol22num2/articulos/microace/index.htm> Citado el: 15/12/2017

La aceleración o desaceleración ejerce una fuerza en la masa la cual desplaza las placas del condensador generando un cambio de capacidad el cual es detectado y procesado para obtener un voltaje a la salida.

Las técnicas convencionales para detectar y medir la aceleración se fundamentan en el primer principio descubierto por Newton y descritos en su Principio de Newton en 1687 La aceleración constante de una masa implica una fuerza ($F = ma$), en donde **F** es la fuerza, **a** es la aceleración y **m** es la masa.

Considerando, una masa fija (m) y un resorte con una rigidez K (constante), si la masa se desplaza una distancia X la aceleración debida a la fuerza restauradora del resorte es $F = KX$. Se encuentra entonces que $a = KX/m$, principio que utilizan los acelerómetros electromecánicos y los micromecanizados.

Un acelerómetro mide la fuerza de inercia generada cuando una masa es afectada por un cambio de velocidad y esta fuerza puede variar la tensión de un resorte, la deformación de un elemento, la frecuencia de vibración de una masa o el cambio de la capacidad interna de un dispositivo.

La fuerza g es una medida de aceleración y está basada en la aceleración que ejerce la gravedad de la Tierra en un objeto cualquiera. Una aceleración de $1g$. es considerada como igual a la gravedad, que es de $9.80665 \text{ (m/s}^2\text{)}$. La fuerza g . para un objeto es de $0g$. en cualquier ambiente sin gravedad, como una caída libre o un satélite orbitando la Tierra y de $1g$. a cualquier objeto estacionario en la superficie de la Tierra al nivel del mar. Adicional a esto, las fuerzas g . pueden ser mayores a 1 , como en una montaña rusa, en una centrifugadora o en un cohete.

La aceleración y la fuerza g puede ser expresada en términos más familiares: una aceleración de $1g$ es la variación de la velocidad en aproximadamente 35 km/h por cada segundo. Si un automóvil viaja a 105 km/h y frena en un segundo experimentará una fuerza de $3g$. Así la expresión " $1g. 9,80665 \text{ m/s}^2$ " significa que por cada segundo que pasa, la velocidad varía en $9,80665 \text{ m/s}$ ($35,30394 \text{ km/h}$). La medición de las fuerzas g . se hace por medio de un acelerómetro.⁷

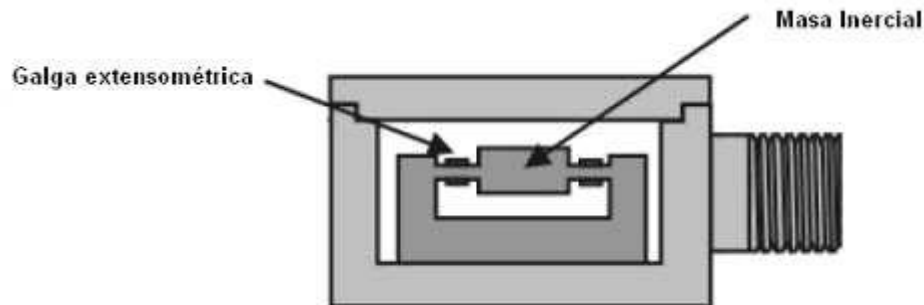
1.3.1 TIPOS DE ACELERÓMETROS. Existen varios tipos de tecnologías, están los piezoeléctricos, piezorresistivos, las galgas extensiométricas, los láseres y los térmicos, diseños que, aunque todos tienen el mismo fin pueden ser distintos según la aplicación y las condiciones de trabajo.

⁷Circelli, G. (12 de febrero de 2015). Acelerómetros de 3 ejes, lo que necesitas saber. Recuperado el 18 de 12 de 2017, de panamahitek: <http://panamahitek.com/acelerometros-de-3-ejes-lo-que-necesitas-saber/>

1.3.1.1 ACELERÓMETROS MECÁNICOS. Emplean una masa inerte y resortes elásticos. Los cambios se miden con galgas extensiométricos, incluyendo sistemas de amortiguación que evitan la propia oscilación.

En este tipo de acelerómetro la aceleración produce una deformación de la galga que se traduce en una variación en la corriente detectada por un puente de Whatestone y la deformación es directamente proporcional a la aceleración aplicada al acelerómetro.⁸

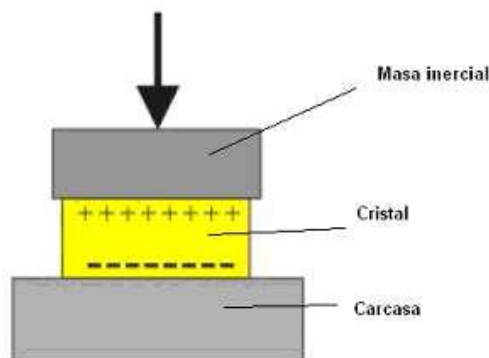
Figura 7. Esquema Acelerómetro Mecánico.



Fuente: Diseño E Implementación De Un Sistema De Adquisición De Aceleraciones Con Procesamiento Mediante Microcontrolador Citado el: 25/01/2018.

1.3.1.2 ACELERÓMETROS PIEZOELÉCTRICOS. Su funcionamiento se basa en el efecto piezoeléctrico en donde una deformación física del material causa un cambio en la estructura cristalina y así cambian las características eléctricas. El funcionamiento de este tipo de acelerómetros se basa en las propiedades de los cristales piezoeléctricos que al ser sometidos a alguna fuerza producen una corriente eléctrica, a causa de la variación de su estructura cristalina.⁸

Figura 8. Diagrama de un acelerómetro piezoeléctrico

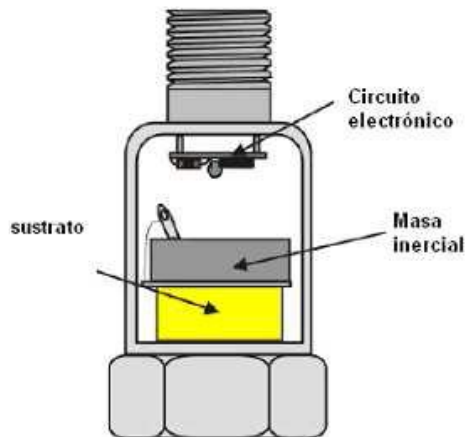


Fuente: Diseño E Implementación De Un Sistema De Adquisición De Aceleraciones Con Procesamiento Mediante Microcontrolador Citado el: 25/01/2018.

⁸ Marta Arenas Mas. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE ACELERACIONES CON PROCESAMIENTO MEDIANTE MICROCONTROLADOR [en línea]. Proyecto fin de carrera. Universidad De Sevilla. Escuela Técnica Superior De Ingenieros. Departamento De Ingeniería Electrónica, junio 2008. p. 41. [Consultado: 25 de enero de 2018]. Disponible en Internet: Trabajos y proyectos fin de estudios de la E.T.S.I. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11638/fichero/Capitulo+4.pdf>

1.3.1.3 ACELERÓMETROS PIEZORRESISTIVOS. Un acelerómetro piezorresistivo utiliza un sustrato, de tal forma que las fuerzas que las masas ejercen sobre él varían su resistencia, que forma parte de un circuito que mediante un puente de Whatestone mide la intensidad de la corriente. ⁹

Figura 9. Diagrama de un acelerómetro piezorresistivo



Fuente: Diseño E Implementación De Un Sistema De Adquisición De Aceleraciones Con Procesamiento Mediante Microcontrolador Citado el: 25/01/2018.

1.3.1.4 ACELERÓMETROS MICROMECAÑICOS (MEMS). Los avances en tecnología micro electromecánica de los sistemas (MEMS) han permitido a los acelerómetros ser puestos en funcionamiento para muchos usos en las distintas industrias.

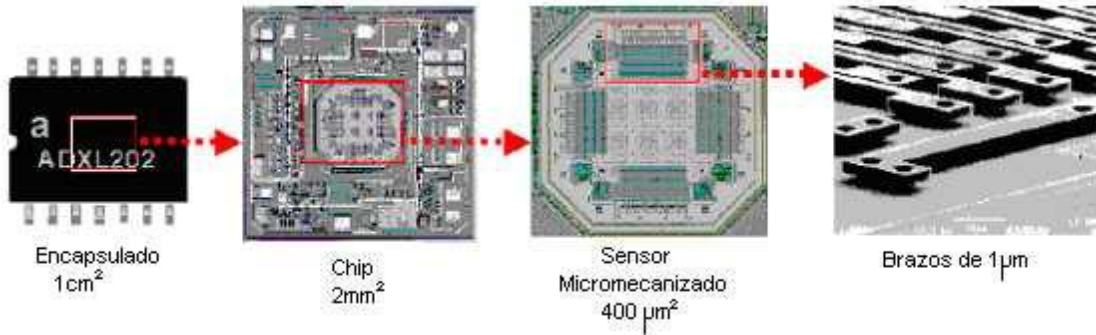
Se distinguen tres categorías de acelerómetros MEMS:

- El capacitivo de silicio.
- El piezorresistivo.
- Los acelerómetros térmicos.

En la actualidad los acelerómetros capacitivos de silicio son los más utilizados en la industria en general. La figura 10 se muestra el diagrama del interior de un acelerómetro.

⁹ Marta Arenas Mas. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE ACELERACIONES CON PROCESAMIENTO MEDIANTE MICROCONTROLADOR [en línea]. Proyecto fin de carrera. Universidad De Sevilla. Escuela Técnica Superior De Ingenieros. Departamento De Ingeniería Electrónica, junio 2008. p. 42. [Consultado: 25 de enero de 2018]. Disponible en Internet: Trabajos y proyectos fin de estudios de la E.T.S.I. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11638/fichero/Capitulo+4.pdf>

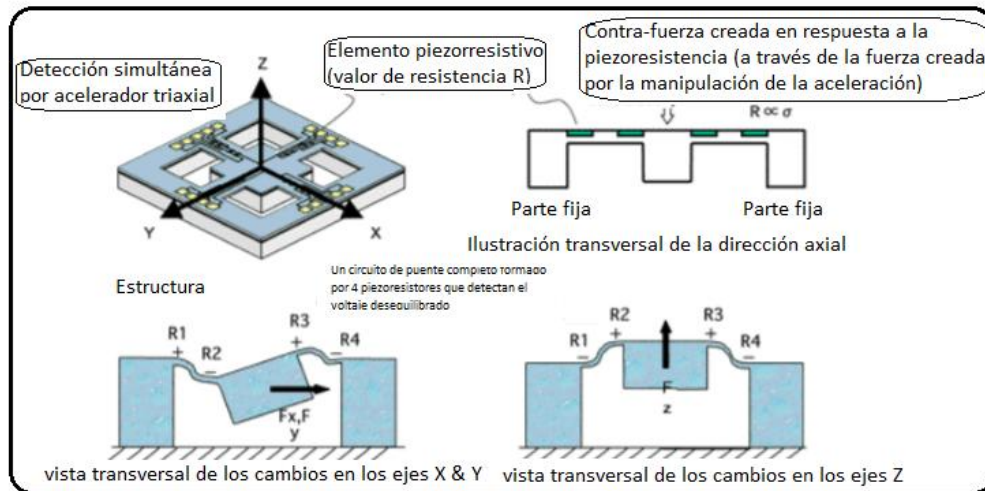
Figura 10. Esquemático del interior de un Acelerómetro MEMS.



Fuente: Diseño E Implementación De Un Sistema De Adquisición De Aceleraciones Con Procesamiento Mediante Microcontrolador Citado el: 25/01/2018.

Los acelerómetros piezorresistivos son muy adecuados para acelerómetros compactos de tres ejes. La figura 11 detalla el funcionamiento de un acelerómetro desarrollado por Hitachi.¹⁰

Figura 11. Esquemático funcionamiento Acelerómetro Hitachi.

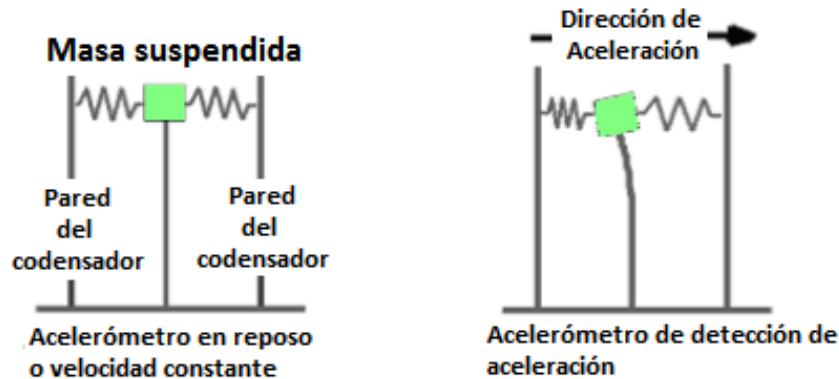


Fuente: Diseño E Implementación De Un Sistema De Adquisición De Aceleraciones Con Procesamiento Mediante Microcontrolador Citado el: 25/01/2018.

¹⁰ Marta Arenas Mas. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE ACELERACIONES CON PROCESAMIENTO MEDIANTE MICROCONTROLADOR [en línea]. Proyecto fin de carrera. Universidad De Sevilla. Escuela Técnica Superior De Ingenieros. Departamento De Ingeniería Electrónica, junio 2008. p. 47-49. [Consultado: 25 de enero de 2018]. Disponible en Internet: Trabajos y proyectos fin de estudios de la E.T.S.I. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11638/fichero/Capitulo+4.pdf>

1.3.1.5 ACELERÓMETROS CAPACITIVOS. En estos se modifica la posición relativa de las placas de un microcondensador de tal manera que la respuesta a la variación de la aceleración varía la capacidad entre conductores como se puede observar en la figura 12. (a) y figura 12. (b).¹¹

Figura 12. Esquema del principio de funcionamiento de un acelerómetro de condensador.



Fuente: Diseño E Implementación De Un Sistema De Adquisición De Aceleraciones Con Procesamiento Mediante Microcontrolador Citado el: 25/01/2018

1.3.2 SENSOR SILICON DESIGNS 2012. El sensor 2012 es un acelerómetro integrado, de bajo nivel de ruido construido dentro de una carcasa protectora robusta como se muestra en la figura 13. para medir aceleraciones en entornos comerciales/industriales. Está diseñado para aplicaciones de instrumentación de frecuencia cero a frecuencias cercanas a los 600 Hertz.

Figura 13. Sensor 2012 Silicon Designs.



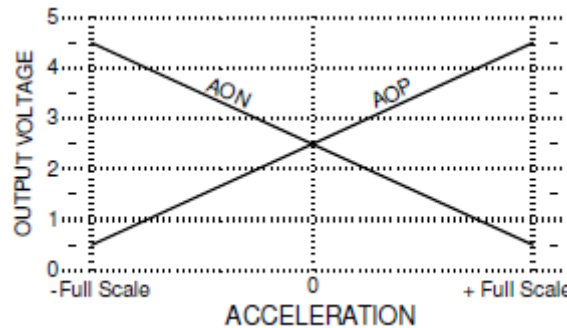
Fuente: *Silicon Designs, Inc.*

El acelerómetro Modelo 2012 produce dos salidas de voltaje analógicas, la AOP y la AON, que varían con la aceleración, como se muestra en la figura 14. Las salidas de señal son diferenciales con respecto a un voltaje de modo común de $\frac{1}{2}$ VDD

¹¹ Marta Arenas Mas. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE ACELERACIONES CON PROCESAMIENTO MEDIANTE MICROCONTROLADOR [en línea]. Proyecto fin de carrera. Universidad De Sevilla. Escuela Técnica Superior De Ingenieros. Departamento De Ingeniería Electrónica, junio 2008. p. 44. [Consultado: 25 de enero de 2018]. Disponible en Internet: Trabajos y proyectos fin de estudios de la E.T.S.I. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11638/fichero/Capitulo+4.pdf>

(aproximadamente 2,5 voltios). En aceleración cero, el voltaje diferencial de salida es nominalmente cero voltios. Para el caso AOP el voltaje máximo de salida es 4 voltios para la máxima aceleración y para el caso AON para máxima aceleración el voltaje de salida es -4 voltios. Para este modelo se considera aceleración positiva la fuerza que empuja la parte inferior del dispositivo debido que el eje sensible es perpendicular a dicha cara.¹²

Figura 14. Comportamiento del acelerómetro 2012.



Fuente: Silicon Designs, Inc.

1.4 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS NI USB-9234, cDAQ-9171

Figura 15. NI USB-9234



Figura 16. cDAQ 9171.



Fuente: National Instruments Corporation.

La tarjeta de adquisición de datos NI USB-9234 que se ve en la figura 15. es el Módulo de adquisición de señales de cuatro canales utilizados para realizar medidas de frecuencia, las cuales pueden provenir de sensores piezoeléctrico en general y particularmente para este proyecto se utilizaron los acelerómetros *silicon design model 2012*. Entre sus características más importantes está la de la simultaneidad

¹² SDI Accelerometer Datasheets Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/0B4eVto02URUhSEgwanZUVmpYM1E/view> Citado el 25/01/2018

en la medición de las señales de entrada y cada canal tiene su filtro anti-aliasing que ajusta la velocidad de muestreo.

En la figura 16. podemos observar el chasis de conexión rápida (*plug-and-play*) cDAQ-9171, el cual adapta la tarjeta de adquisición de datos al computador para su operatividad.¹³

1.5 SIGNALEXPRESS DE LABVIEW

LabVIEW es un software de programación gráfica que ayuda a visualizar cada aspecto de su aplicación, incluyendo configuración de hardware, datos de medidas y depuración. Esta visualización facilita la integración hardware de medidas de cualquier proveedor, el desarrollo de algoritmos de análisis de datos y el diseño interfaces de usuario personalizadas.

SignalExpress es un programa de medición interactivo que se puede usar para adquirir, analizar y presentar rápidamente datos de dispositivos e instrumentos de adquisición de datos, sin necesidad de programación.¹⁴

2. METODOLOGÍA

Con el fin de optimizar la información, para este trabajo se consultaron libros especializados, memoria de eventos nacionales e internacionales como fueron los de Bolivia¹⁵ Venezuela¹⁶ y Colombia¹⁷. Se realizaron pruebas en el laboratorio de física de la UPB para observar el comportamiento de las ondas longitudinales y transversales, se hicieron ensayos de propagación en el edificio K en la placa del laboratorio del tercer piso, en la del primer piso, en la zona campestre de laboratorio de ingeniería civil, pruebas en las que se adquirieron las señales. Posteriormente se analizaron y se observaron los tiempos de propagación tomando en cuenta las distancias entre los sensores y observando los retardos y diferentes tiempos entre ellos. Se agruparon las señales para buscar semejanzas con las cartas sísmicas típicas y así establecer comparación entre las pruebas realizadas y las que se tiene en el campo de la exploración.

¹³ NI 9234 Datasheets Disponible en: http://www.ni.com/pdf/manuals/374238a_02.pdf Citado el 1/02/2018

¹⁴Signal Express Disponible en: <http://www.ni.com/labview/signalexpress/> Citado el 1/02/2018

¹⁵ V. E. L. Juliana and M. S. A. Alberto, "Prototype for the study of physical phenomena manifested in seismic waves," 2014 IEEE ANDESCON, Cochabamba, 2014, pp. 1-1.

doi: 10.1109/ANDESCON.2014.7098578

¹⁶ Salcedo Alex Alberto, Monclou & Vargas, Laura. (2017). Prototipo Preliminar para el estudio de ondas Sísmicas y su aplicación en el laboratorio de ciencias básicas Revista Ciencia e Ingeniería. 38. 141-148.

¹⁷ Salcedo Alex Alberto, Monclou & Vargas, Laura. (2017) Experimento para el estudio de las onda

longitudinales y transversales: una aplicación a las geociencias Disponible en:

<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/azimut/author>

2.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

En este proyecto se desarrolló mediante investigación experimental en la cual se realizaron arreglos lineales con los acelerómetros. La experimentación se ha desarrollado en el ambiente de laboratorio y se hicieron observaciones en los arribos de la señal a los sensores tomando en cuenta los retardos de tiempo.

2.2 INSTRUMENTOS

- Acelerómetros modelo 2012.
- Módulo de Entrada de Sonido y Vibración NI-9234.
- Chasis CompactDAQ USB 9171.
- Fuentes de alimentación DC.
- Equipos de medición: Multímetro.
- Software *SignalExpress de LabView*.
- Cables: Tipo BNC para el DAQ.

2.3 PROCEDIMIENTO

El procedimiento desarrollado en este trabajo de grado permitió el alcance del objetivo general el cual fue la implementación de un arreglo de acelerómetros para el estudio básico de la propagación de ondas mecánicas.

A continuación, se describen los objetivos específicos propuestos como parte de la investigación experimental que se propuso.

2.3.1 Observación de las características y modos de propagación de las ondas mecánicas

Al estudiar el concepto de onda mecánica se comprende que ésta consiste en la propagación debido a una perturbación física, energía que se propaga en un medio dando lugar a las denominadas ondas superficiales y ondas de cuerpo como se describe en el marco teórico: “Las superficiales se originan y propagan cerca de la superficie entre dos medios con propiedades elásticas diferentes, mientras que las ondas de cuerpo se propagan a través de todo el volumen de material elástico. Cuando el material del subsuelo es isótropo se propagan dos tipos de ondas de cuerpo: las ondas P y las ondas S.”¹⁸.

En el laboratorio de física de la UPB mediante el experimento clásico de ondas se observaron las ondas longitudinales como se muestra en la figura 1. y las transversales como se muestra en la figura 2. experimento grabado que evidencia el comportamiento de las ondas que se puede visualizar en el siguiente link: <https://youtu.be/q5QZunVILLk>

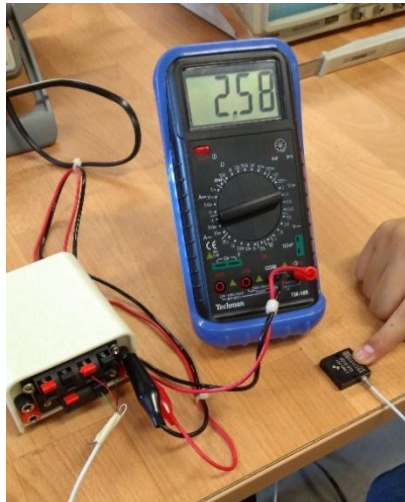
¹⁸ Serway, R. A., & Jewett, J. W. Op. cit., p. 215.

2.3.2 Caracterización y adaptación del comportamiento de los acelerómetros para su uso en el estudio de propagación de ondas

Para este desarrollo se establecieron los siguientes pasos que se encuentran en el anexo 3, Practica 1:

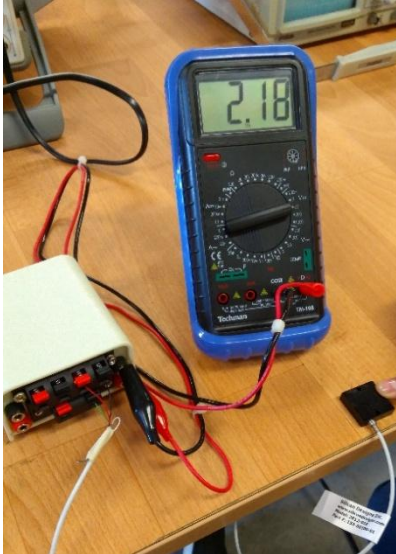
- Estudio de las características de los acelerómetros de la hoja de datos proporcionada por el fabricante como la relación aceleración voltaje de salida, rango de frecuencia de trabajo y rango de aceleración de los dispositivos.
- Conexión del acelerómetro de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Fuente DC de 5V.
- Fijación del acelerómetro en la posición +g. (*lid up*-cara superior hacia arriba) y verificación del voltaje de salida análogo (AOP/ cable verde) (Figura 17).

Figura 16. Verificación del voltaje AOP +g.



- Fijación del acelerómetro en la posición -g. (*lid down* -cara superior hacia abajo) y verificación del voltaje de salida análogo (AOP/ cable verde) (Figura 18).

Figura 17. Verificación del voltaje AOP -g.



2012-005.

+g.=2.86

-g.=2.06

2012-010.

+g.=2.59V

-g.=2.19V

- Se aplicaron las fórmulas (1.1) y (1.2) propuestas por el fabricante tomando en cuenta el acelerómetro a caracterizar. Y la fórmula (1.3) aporte de este trabajo de grado. Se obtuvo la pendiente Voltaje vs Aceleración y se compararon los resultados con los proporcionados en la hoja de datos del fabricante.

Tabla 1. Especificaciones Modelo 2012.

ESPECIFICACIONES PARA TODOS LOS MODELOS				
Vs=+5V DC, TC=25°C				
PARAMETROS	MIN	TYP	MAX	UNIDADES
Error de calibración de polarización		0.25	0.9	± % of span

Fuente: *Silicon Designs Inc.*

Cálculo de polarización para 0g (2012-005)

$$[+g. \text{ Reading} - (-g. \text{ Reading})] \quad (1.1)$$

$$(2.86-2.06) = 0.8 \text{ V}$$

Cálculo de polarización para 0g (2012-010)

$$[+g. \text{ Reading} - (-g. \text{ Reading})]$$

$$(2.59-2.19) = 0.4 \text{ V}$$

El error de calibración de polarización encontrado en las pruebas de verificación del voltaje de salidas análogas de los acelerómetros (0.8V para el 2012-005 y 0.4V para 2012-010) quedó dentro del rango 0.25V y 0.9V de las especificaciones de los modelos de los acelerómetros empleados. Tabla 1.

Cálculo de la sensibilidad

La hoja de datos proporciona la sensibilidad y el procedimiento matemático es el siguiente: Se divide el rango de salida del acelerómetro para AOP de 4V (4000 mV) por la cantidad de gravedades. Como lo muestra en la figura 19.

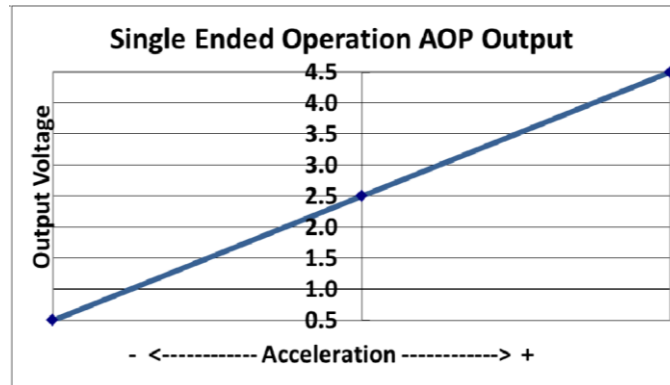
$$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{Voltaje de salida máximo}}{\# \text{ gravedades}} \text{ [mV]} \quad (1.2)$$

Voltaje de salida máximo de salida= 4V (4000 mV).

gravedades. Consultar hoja de datos según el modelo Available G-Ranges

- Para el modelo 2012-005 es de 5g. entonces $4000/5 = 800\text{mV}$ para +/- 1g. Esto significa que 1 g de aceleración es igual a 400 mV
- Para el modelo 2012-010 es de 10g. entonces $4000/10 = 400\text{mV}$ para +/- 1g. Esto significa que 1 g de aceleración es igual a 200 mV

Figura 18. Salida AOP en operación simple según Fabricante.



Fuente: Silicon Designs Inc.

Caracterización de la sensibilidad de los acelerómetros

Para el voltaje de salida análogo (AOP) del sensor 2012-005, el acelerómetro se ubicó en la posición +g. (*lid up*) y el valor obtenido fue de 2.86 V. Se Tomó este valor para +g. y se le sumaron 400 mv para cada +g. hasta llegar a los +5g. rango máximo trabajo propio del sensor. Para -g. (*lid down*) se restan 400 mv para cada -g. hasta llegar a los -5g. rango máximo trabajo del sensor. La ecuación 1 muestra de manera analítica el procedimiento mediante de la ecuación clásica de la recta $Y=mx+b$; $m=$ salida (V)/aceleración (+g). Desarrollo que se encuentra en el Anexo 1.

$$V_{out} = \text{sensibilidad (V)} \times (\#g) + ([+g] - \text{sensibilidad (V)}) \quad (1.3)$$

Sensibilidad (m): Voltaje de salida máximo / # gravedades.
+g: Voltaje de salida análogo (AOP) en reposo.
#g: Cantidad de gravedad a calcular del sensor.

Nota: El mismo procedimiento se aplica al 2012-010 con sus respectivos datos.

Los resultados obtenidos se pueden apreciar en la figura 20 y figura 21.

Figura 19. Salida AOP calculada 2012-005.

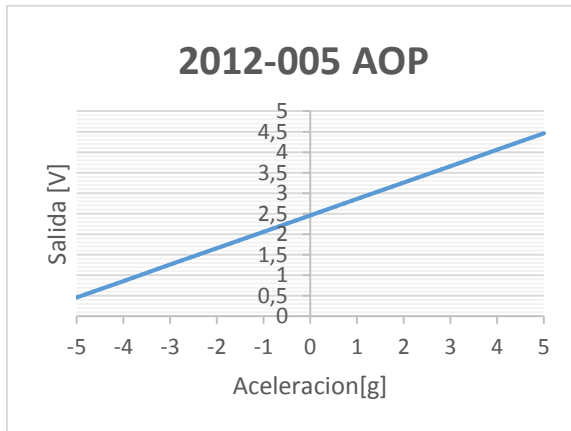
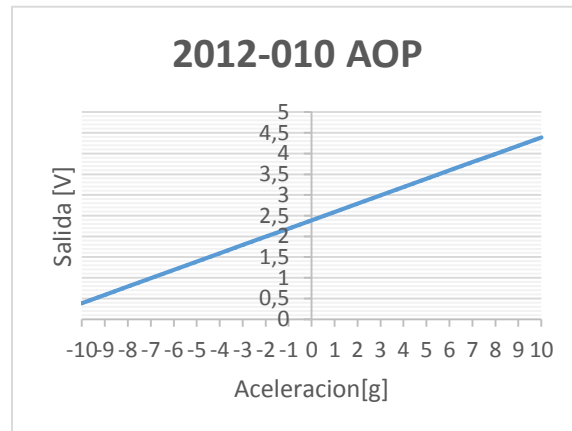


Figura 20. Salida AOP calculada 2010-010.



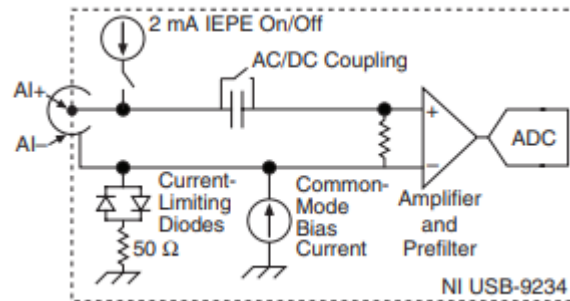
2.3.3 Estudio e instalación de la tarjeta de adquisición de datos para la recepción de las señales de los acelerómetros

Se realizó el estudio y montaje de la tarjeta NI 9234 la cual actúa como la interfaz entre el PC y los acelerómetros modelo 2012. Esta funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que el PC las interprete. El dispositivo de adquisición de datos (DAQ) usado para medir las señales y está compuesto por las siguientes etapas:

- El circuito de acondicionamiento de señales.
- El convertidor analógico-digital (ADC).
- El cable USB.

La figura 22 muestra el acople de la señal de entrada al NI 9234 al ADC y para el ajuste de la velocidad del muestreo se tiene un filtro anti-aliasing.¹⁹


Figura 21. Estructura interna para un canal del módulo de entrada de sonido y vibración NI 9234.



Fuente: National Instruments Corporation.

El sensor 2012 en sus terminales tiene un arreglo de 4 cables como se muestra en la tabla 2. Se alimenta con un voltaje de 5V proporcionado por una fuente.

Tabla 2. Convenciones terminales SDI 2012.

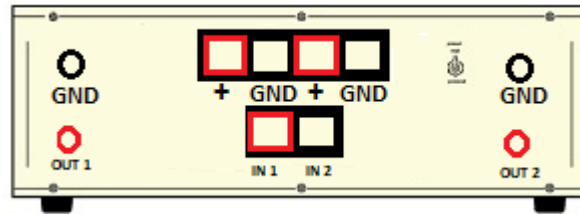
+5v: Cable rojo	Arreglo de 4 cables. 
GND: Cable negro	
AOP: (Salida) cable verde	
AON: (Salida) cable blanco	

Fuente: Silicon Designs Inc.

Se adecuó un módulo que contiene la fuente de alimentación de 5V DC para 2 sensores y los bornes I/O de entrada de señal proveniente del sensor y la salida para acoplarla a la tarjeta de adquisición de datos como se observa en la figura 23.

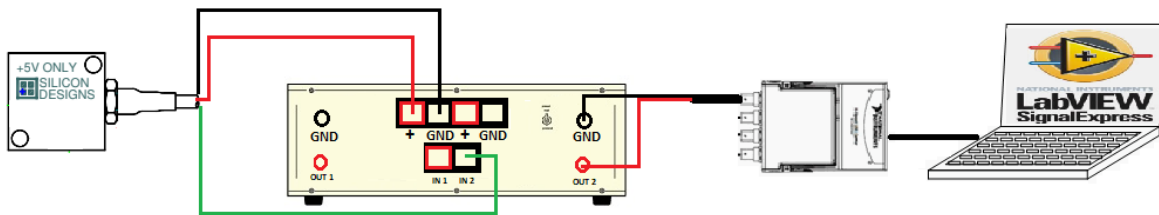
¹⁹ Datasheet NI 9234 Disponible en: http://www.ni.com/pdf/manuals/374238a_02.pdf Citado el 9/03/2018

Figura 22. Módulo fuente y borneras I/O para los acelerómetros.



Con los cables BNC el módulo de entrada de sonido y vibración toma las señales de los acelerómetros. La conexión del DAQ al PC se hace por medio de un cable USB que sirve para pasar instrucciones y mediciones, como se muestra en la figura 24.

Figura 23. Esquema de conexión del sistema.

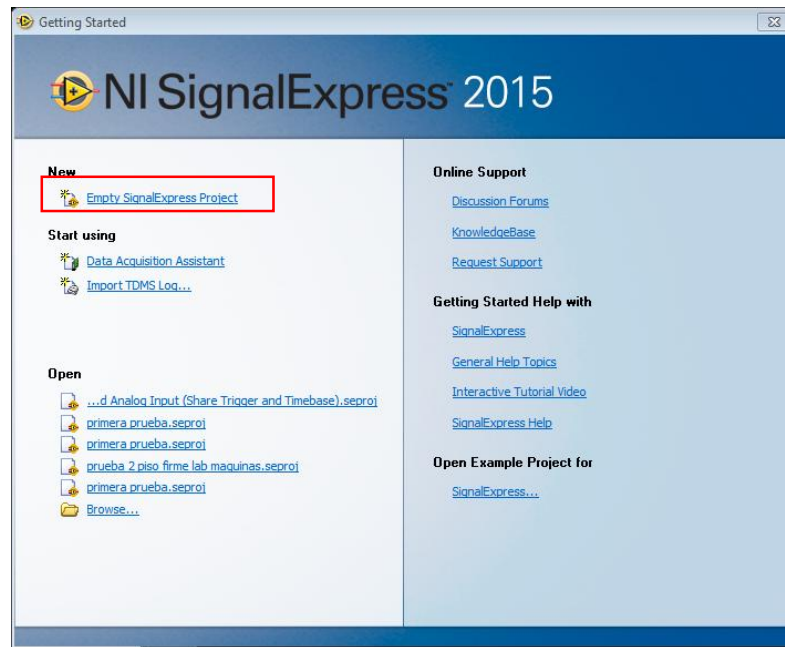


2.3.4 Adecuación de una herramienta software para la captura de las señales generadas

En la adecuación de la herramienta software se establecieron los siguientes pasos que se encuentran en el anexo 3, Practica 2:

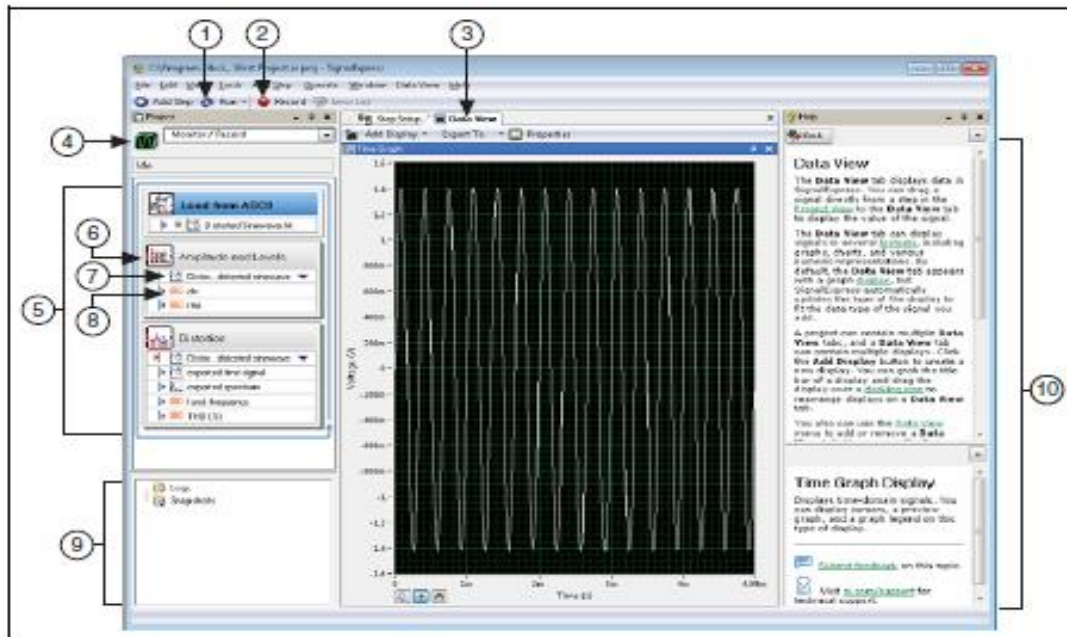
- Teniendo todas las conexiones correspondientes de los sensores como se muestra en la figura 24. e instalado el software de registro de datos y medidas Interactivas *SignalExpress* de *LabVIEW*, se abre el programa y se despliega la ventana de la figura 25:

Figura 24. Ventana de inicio de *SignalExpress*.



- Una vez en la ventana se selecciona *Empty SignalExpress Project*, para crear un nuevo proyecto.
- Dentro del programa se visualiza una ventana como la de la figura 26. que contiene los siguientes elementos:

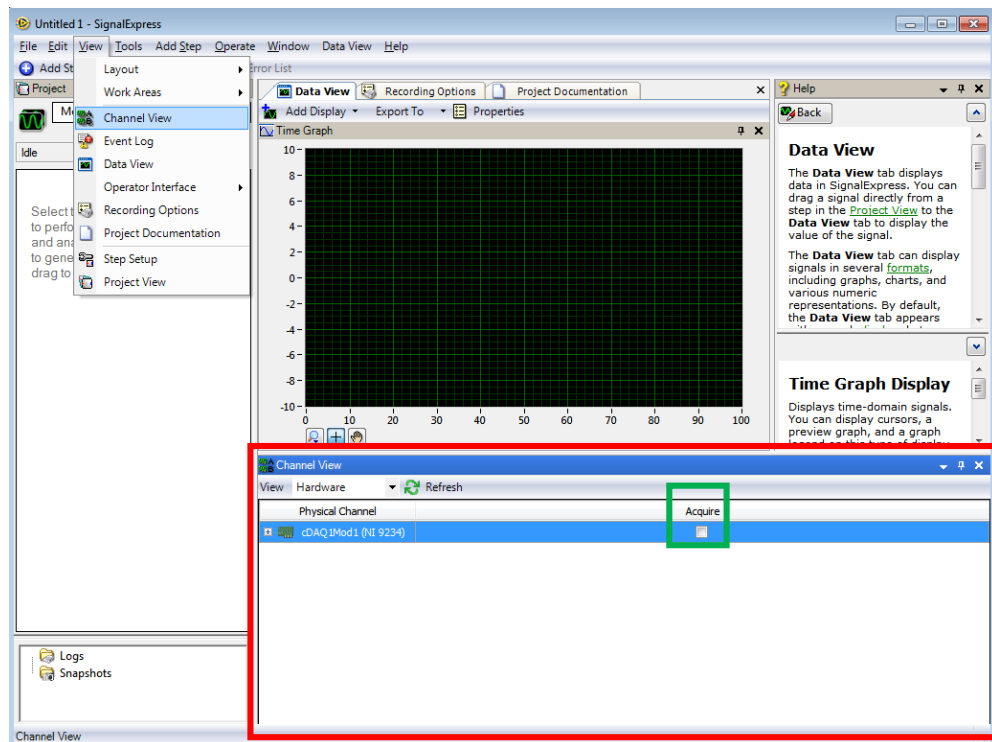
Figura 25. Elementos de la ventana principal de *SignalExpress*.



1. Botón Ejecutar
2. Botón Grabar
3. Vista principal con la pestaña Vista de datos visible
4. Menú desplegable del área de trabajo
5. Vista del proyecto
6. Pasos
7. Entrada
8. Salida
9. Ventana de datos registrados
10. Ayuda contextual

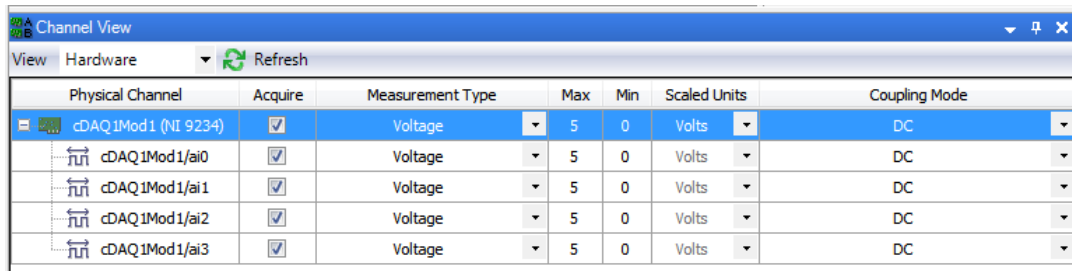
- En la barra de herramientas se hace clic sobre la pestaña *View*, se selecciona la opción *Channel view* (Figura 27) que despliega una nueva ventana en donde se visualiza la tarjeta conectada.

Figura 26. Selección de la tarjeta a utilizar.



- Se hace clic en *Acquire* de la figura 27. para seleccionar la tarjeta de la que se desea adquirir información.
- En la ventana de *Channel View* (Figura 28) se elabora la respectiva configuración:

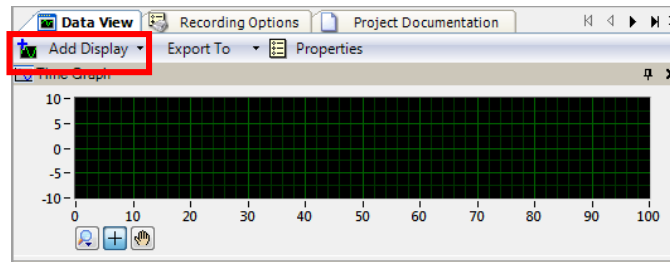
Figura 27. Configuración de los canales a utilizar.



Physical Channel	Acquire	Measurement Type	Max	Min	Scaled Units	Coupling Mode
cDAQ1Mod1 (NI 9234)	<input checked="" type="checkbox"/>	Voltage	5	0	Volts	DC
cDAQ1Mod1/ai0	<input checked="" type="checkbox"/>	Voltage	5	0	Volts	DC
cDAQ1Mod1/ai1	<input checked="" type="checkbox"/>	Voltage	5	0	Volts	DC
cDAQ1Mod1/ai2	<input checked="" type="checkbox"/>	Voltage	5	0	Volts	DC
cDAQ1Mod1/ai3	<input checked="" type="checkbox"/>	Voltage	5	0	Volts	DC

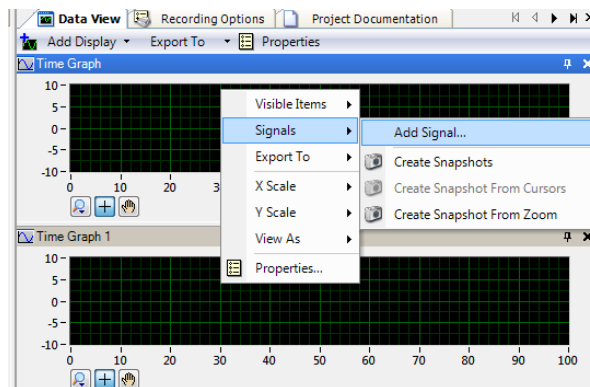
- Para la medición de voltaje se selecciona *Measurement Type= Voltage* *Max=5*, *Min=0*, en *Coupling Mode: DC* que es el tipo de fuente que se usa.
- En la pestaña *Data View* (Figura 29). se añade la cantidad de ventanas necesarias para la visualización de las señales.

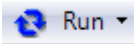
Figura 28. Ventana de visualización de datos.



- Para cada *display* (Figura 30). se incorpora la señal a visualizar

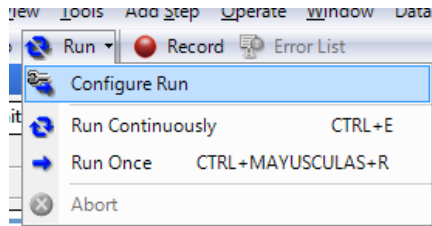
Figura 29. Incorporación de señales.



- Para iniciar la visualización de las señales se hace clic sobre el botón .
- Para la toma de señal se graba un tiempo de 2 segundos, tiempo suficiente para realizar la perturbación.

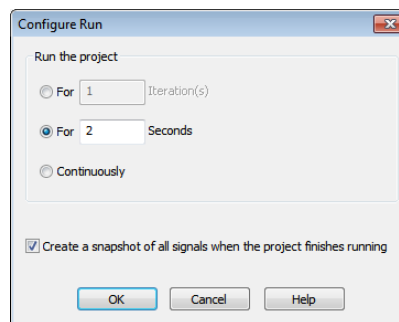
- Se hace clic la forma ▼ del botón  Figura 31.

Figura 30. Menú Run.



- Se despliega la siguiente ventana figura 32. y se configura de la siguiente forma:

Figura 31. Ventana de configuración de Run.




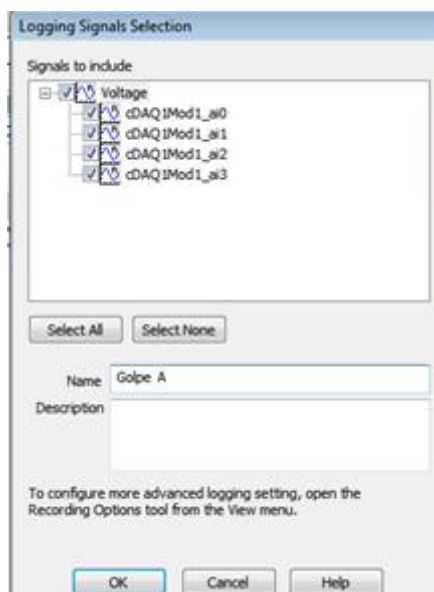
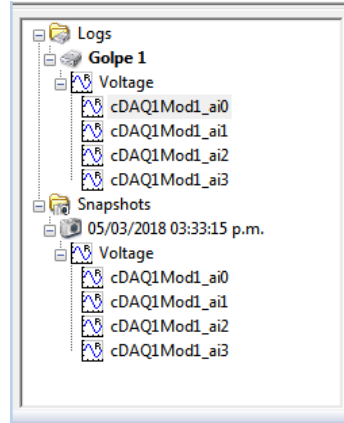
- Para iniciar la grabación se hace clic en el botón ; se seleccionan las señales a guardar y se le asigna un nombre.

Figura 32. Selección de señales a grabar.



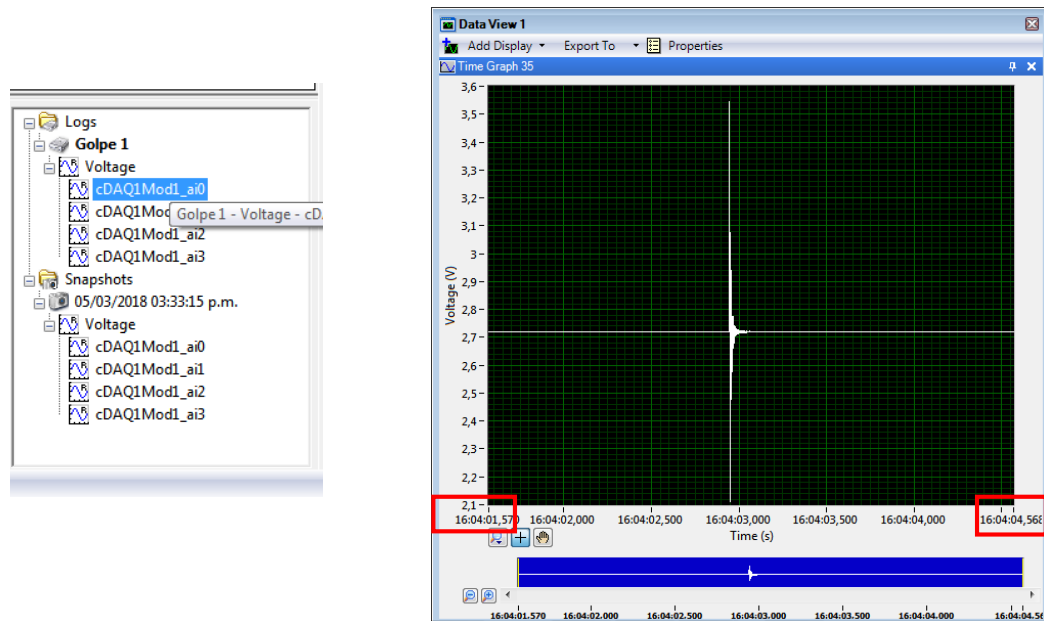
- Al hacer clic en *OK* automáticamente inicia la toma de datos, tiempo en el que se hace la perturbación para registrarla. Estos datos guardados se observan en la ventana de datos registrados (Figura 34).

Figura 33. Ventana de datos registrados.



- Al hacer doble clic sobre algunas de las señales registradas, se puede ver la señal guardada. Figura 35.

Figura 34. Señal guardada en el canal 0.

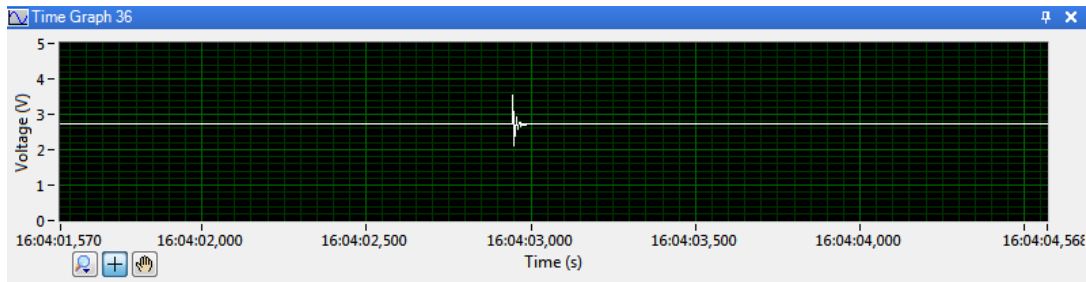


- El tiempo que se visualiza en la imagen es la hora en que se hizo la toma, posteriormente debe ajustarse.
- Después de tomar todos los datos; se procede al análisis de la información, para esto se cierra todos los *displays* abiertos y se abre unos nuevos, o en su defecto se dejan los mismos y se eliminan las señales visualizadas

haciendo clic derecho» *signals*» *remove signals*» se seleccionan las señales a eliminar.

- En la ventana de datos registrados, se pone el cursor sobre la señal a visualizar y se arrastra hasta el *display*. Figura 36.

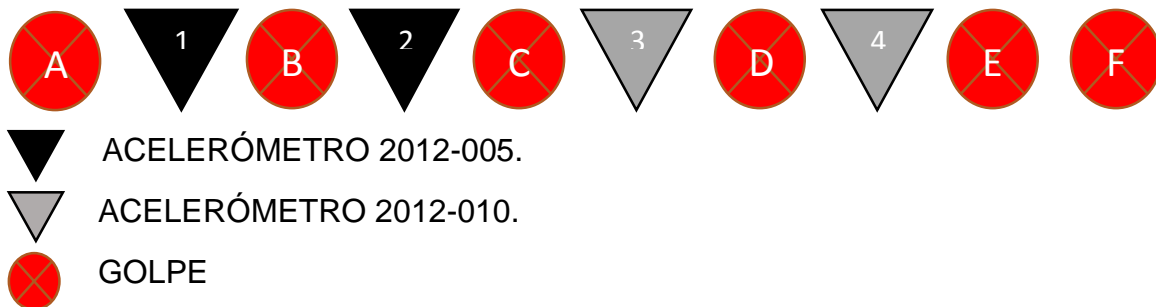
Figura 35. Análisis de señal.



2.3.5 Ensayos para la adquisición y almacenamientos de datos

Para el objetivo propuesto de medir el parámetro tiempo de propagación de las ondas se escogió un arreglo de tipo lineal como el de la figura 37. Teóricamente el comportamiento de las ondas longitudinales u ondas P son las primeras en llegar al sensor y las transversales u ondas S tiene un tiempo mayor de llegada. En este arreglo cada acelerómetro recibe datos de un punto de golpe ubicado entre los sensores y en los extremos del arreglo. En el anexo 3, Practicas 3 y 4 se explica el procedimiento para realizar los experimentos con diferentes arreglos.

Figura 36. Arreglo lineal de cuatro acelerómetros desarrollado en los experimentos.



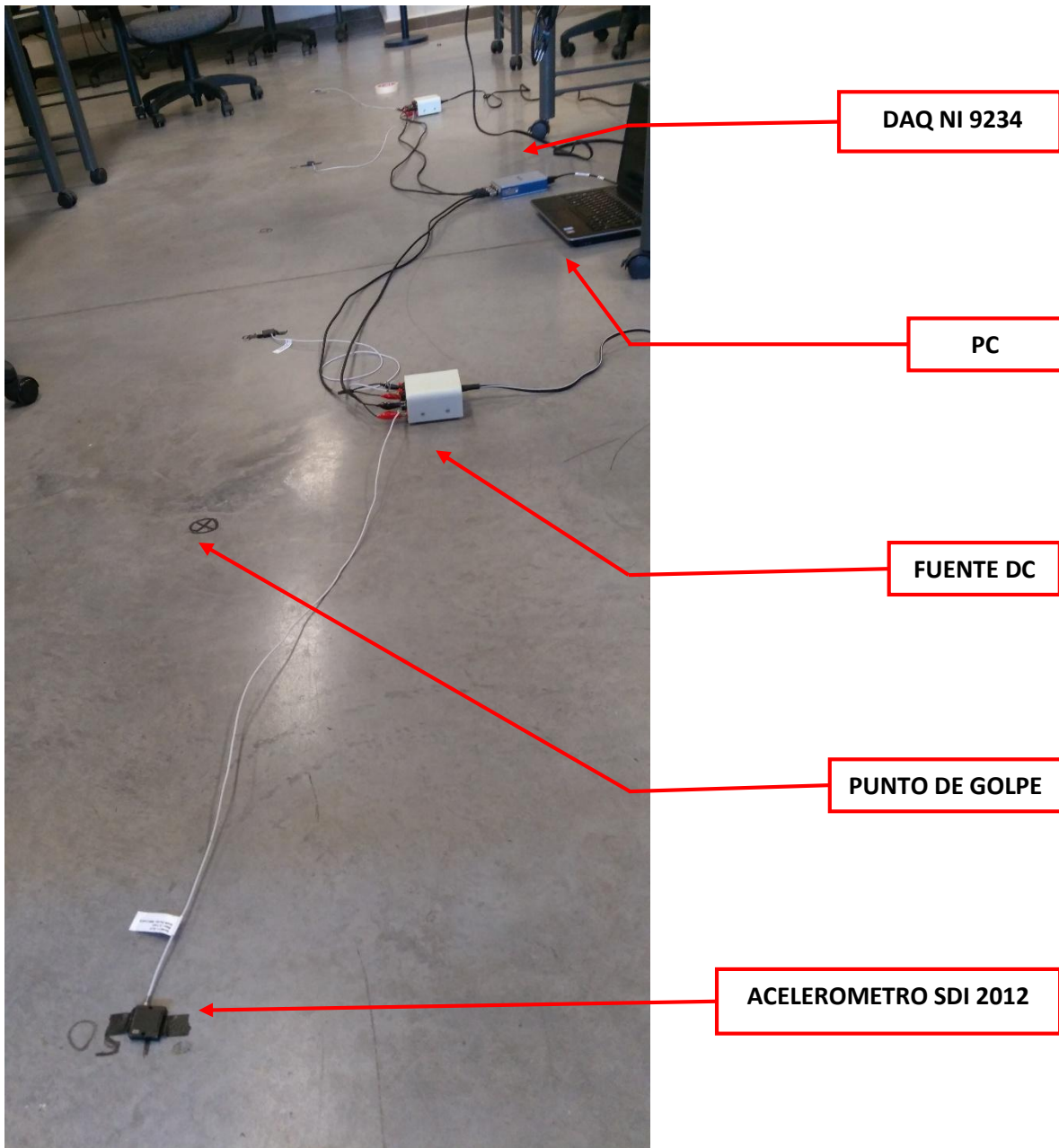
2.3.5.1 ARREGLO EN LABORATORIO DE COMUNICACIONES K-309.

La foto 1 muestra el arreglo para los experimentos que involucran los puntos de golpe A al F de la figura 38 a la figura 51, desarrollado en el laboratorio de comunicaciones en donde se detalla la posición de los sensores, fuentes de alimentación, puntos de golpes, tarjeta de adquisición de datos, conexión al computador y las señales Voltajes vs Tiempo entregadas por el software.

- Distancia entre cada sensor: 1.5 metros.
- Distancia entre fuente y sensor: 0.75 metros

- Golpe con martillo: se realizó en el punto medio entre sensores.

Foto 1 Arreglo lineal en el laboratorio de comunicaciones k-309.



Las datos obtenidos se adquirieron en el PC con *SignalExpress* y para la toma de estos se configuró un tiempo de 2 Segundos. El tiempo de análisis de las señales se ajustó en un rango de 30 ms. (16:04:02:948-16:04:02:978).

PRIMER GOLPE: Punto A de la figura 38.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 39.
 - Sensor 1: 0.75 ms / 2.9 V
 - Sensor 2: 1.65 ms / 2.875 V
 - Sensor 3: 2.5 ms / 2.57 V
 - Sensor 4: 3.5 ms / 2.606 V

Figura 37. Golpe A, primer experimento.

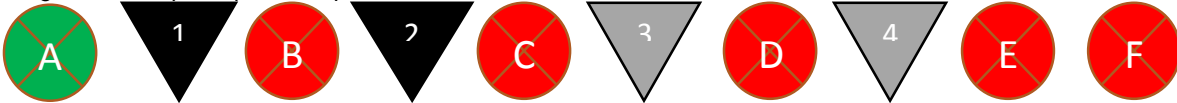
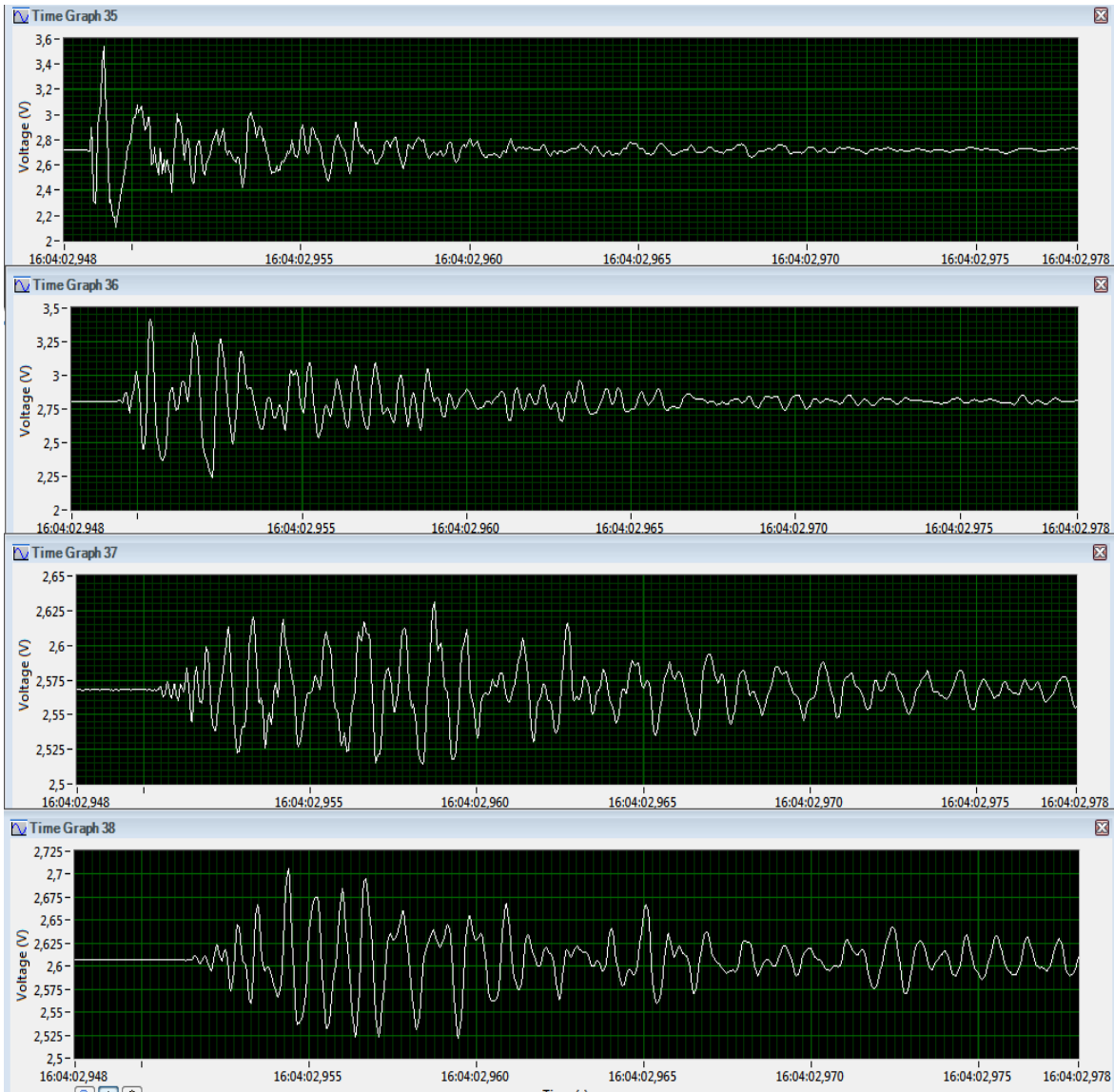


Figura 38. Señales del golpe A, primer experimento.



SEGUNDO GOLPE: Punto B de la figura 40.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 41.
 - Sensor 1: 1 ms / 2.85 V
 - Sensor 2: 1.375 ms / 2.812 V
 - Sensor 3: 2.125 ms / 2.58V
 - Sensor 4: 3.375 ms / 2.82 V

Figura 39. Golpe B, Primer experimento.

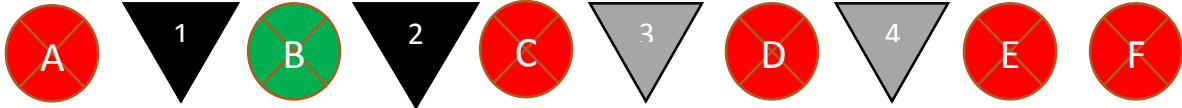
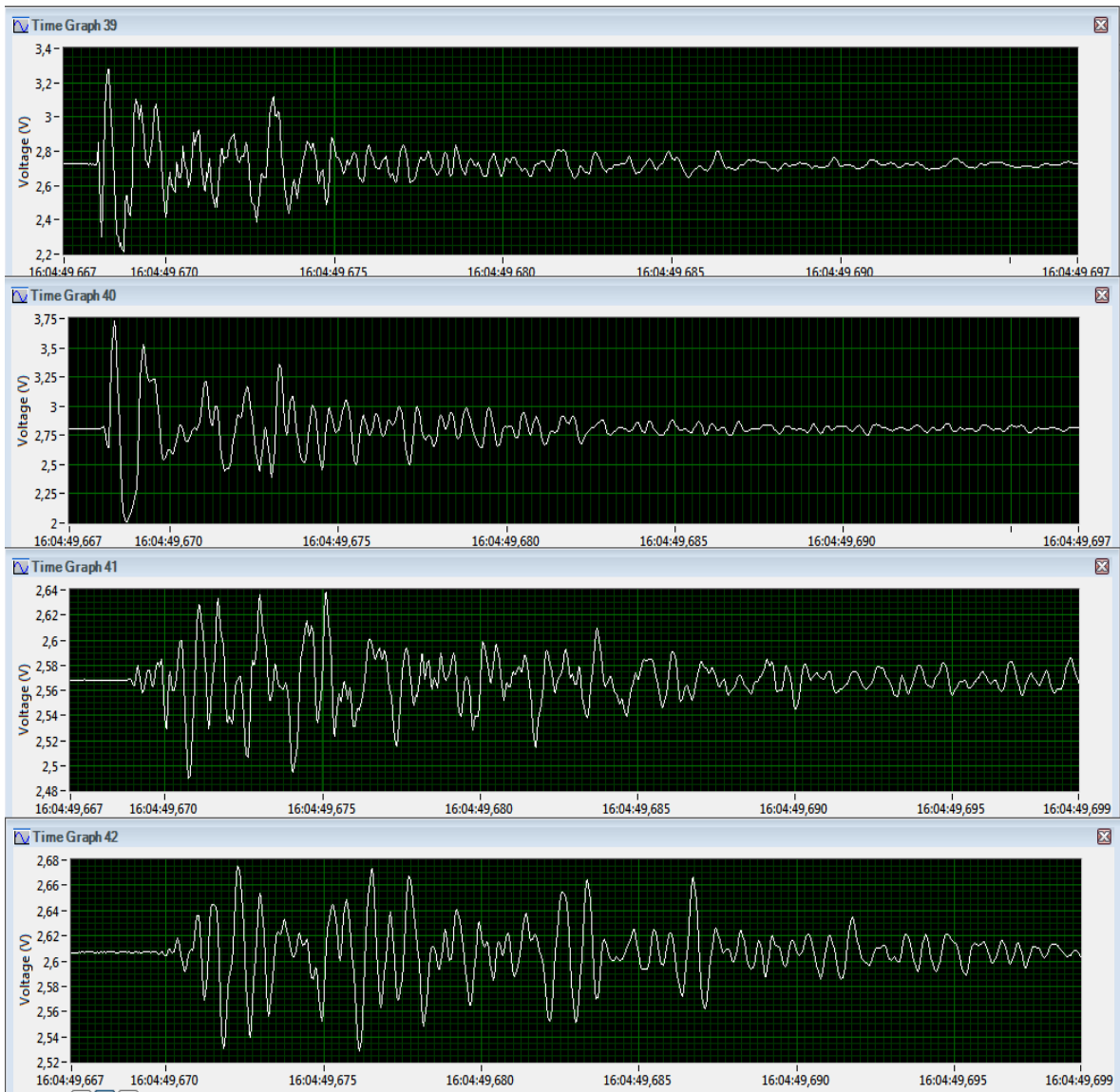


Figura 40. Señales del golpe B, primer experimento.



TERCER GOLPE: Punto C de la figura 42.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes. Figura 43.
 - Sensor 1: 3.375 ms / 2.73 V
 - Sensor 2 : 2.75 ms / 2.92 V
 - Sensor 3: 2 ms / 2.75 V
 - Sensor 4: 3 ms / 2.7 V

Figura 41. Golpe C, Primer experimento.

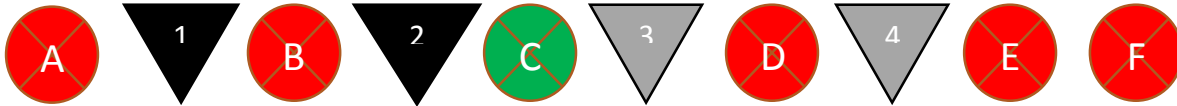
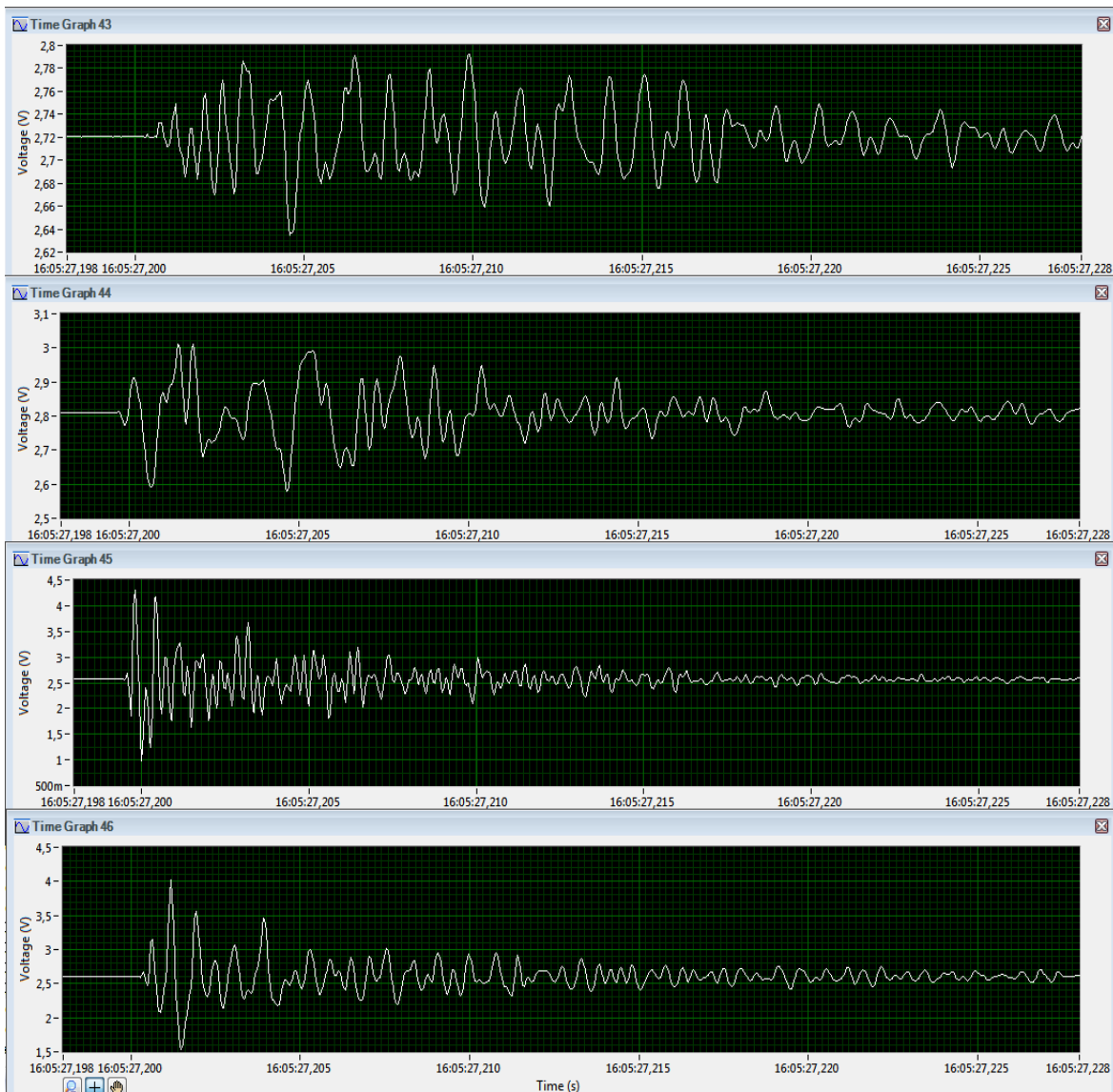


Figura 42. Señales del golpe C, primer experimento.



CUARTO GOLPE: Punto D de la figura 44 .

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 45 .
 - Sensor 1: 3 ms / 2.712 V
 - Sensor 2: 2 ms / 2.825 V
 - Sensor 3 : 0.75 ms / 2.62 V
 - Sensor 4: 1 ms / 2.7 V

Figura 43. Golpe D, Primer experimento.

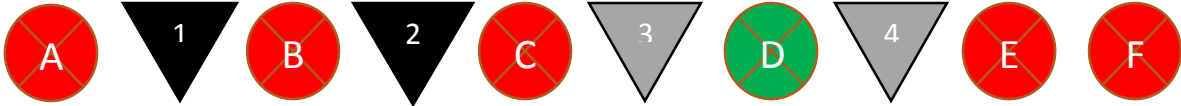
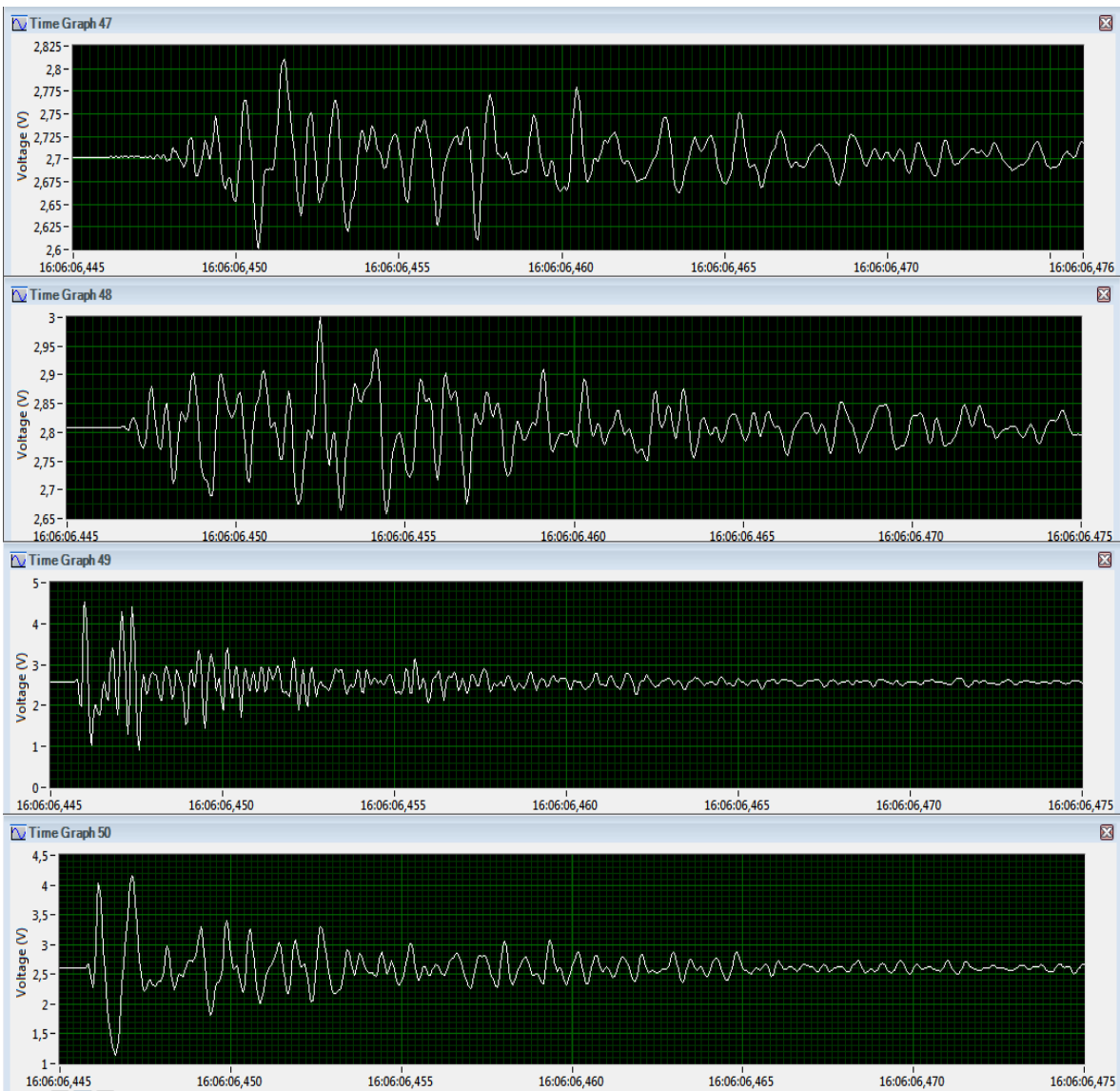


Figura 44. Señales del golpe D, primer experimento.



QUINTO GOLPE: Punto E de la figura 46.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 47.
 - Sensor 1: 5.25 ms / 2.72 V
 - Sensor 2: 4.25 ms / 2.82 V
 - sensor 3: 2.5 ms / 2.58 V
 - Sensor 4: 1 ms / 2.625 V

Figura 45. Golpe E, Primer experimento.

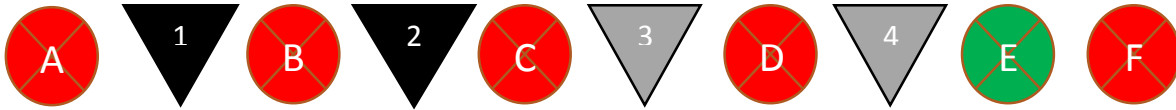
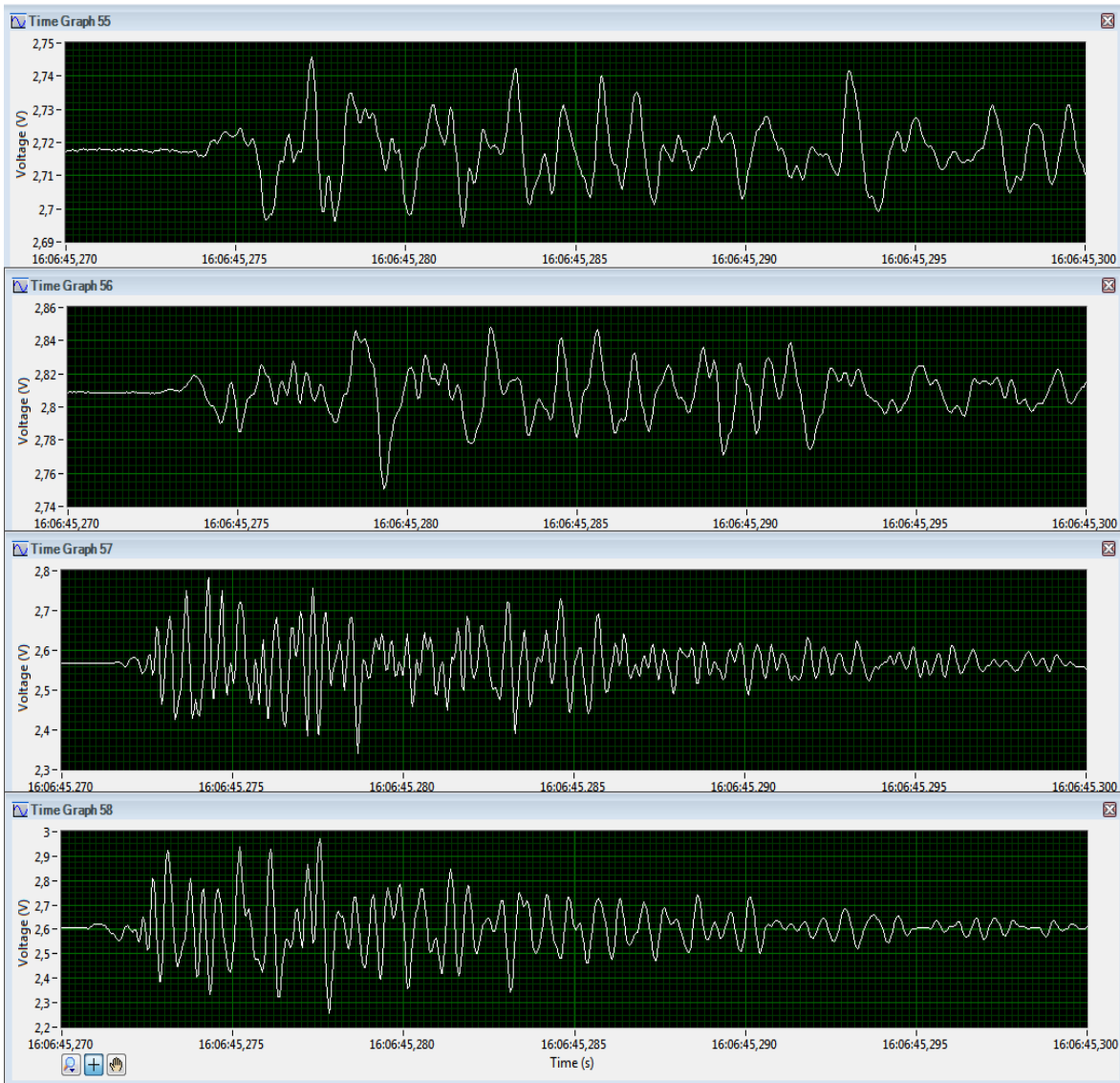


Figura 46. Señales del golpe E, primer experimento.



SEXTO GOLPE: Punto F de la figura 48.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 49.
 - Sensor 1: 4.125 ms / 2.72 V
 - Sensor 2: 2.75 ms / 2.83 V
 - Sensor 3: 1.5 ms / 2.58 V
 - Sensor 4: 0.875 ms / 2.62 V

Figura 47. Golpe F, Primer experimento.

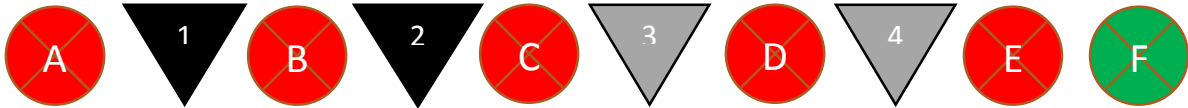
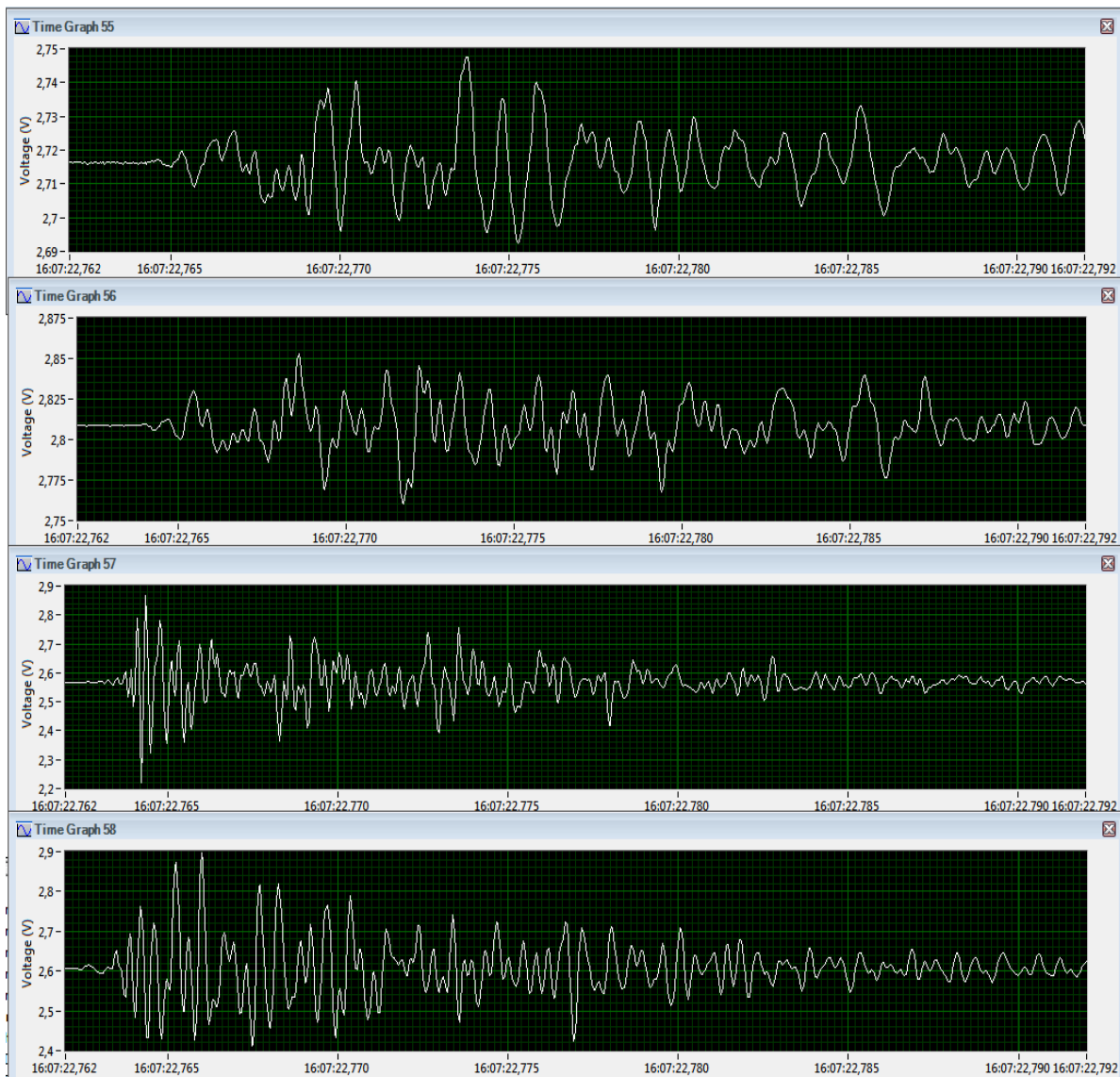


Figura 48. Señales del golpe F, primer experimento.



Para el caso de la figura 51 se hizo un análisis cualitativo en donde se observó el comportamiento de la respuesta en el tiempo del único acelerómetro activo (sensor 1) a medida que la distancia entre el sensor y el golpe aumenta. Es notable el retardo en el tiempo y se puede detallar en el primer arribo para los golpes C, D, E y F. Así como la simetría en el mismo primer arribo debido a los golpes en los puntos A y B.

Figura 49. Todos los golpes captados por el sensor 1, primer experimento.

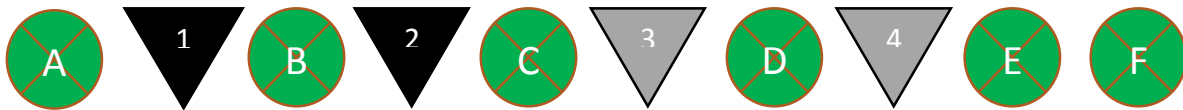
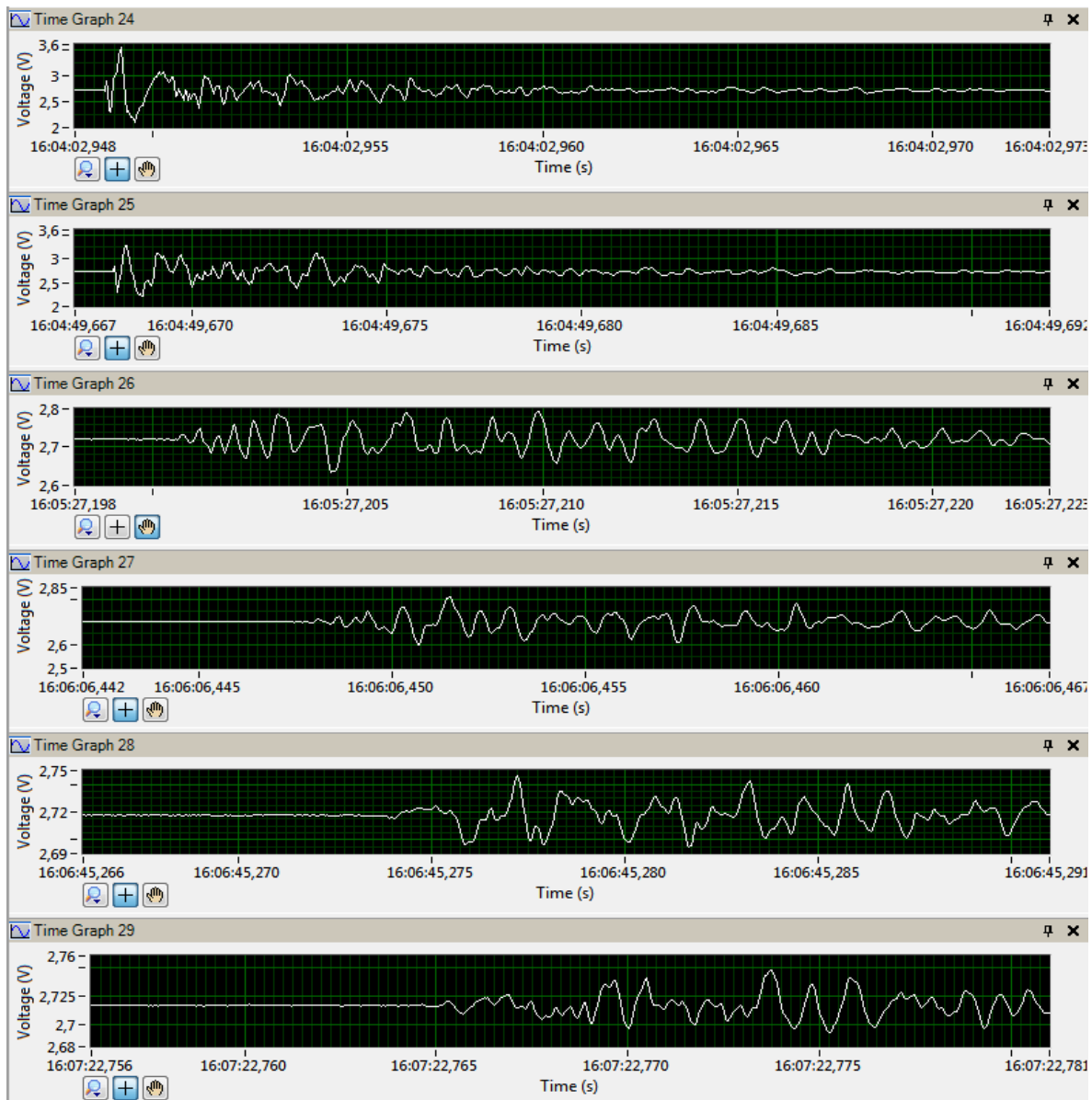


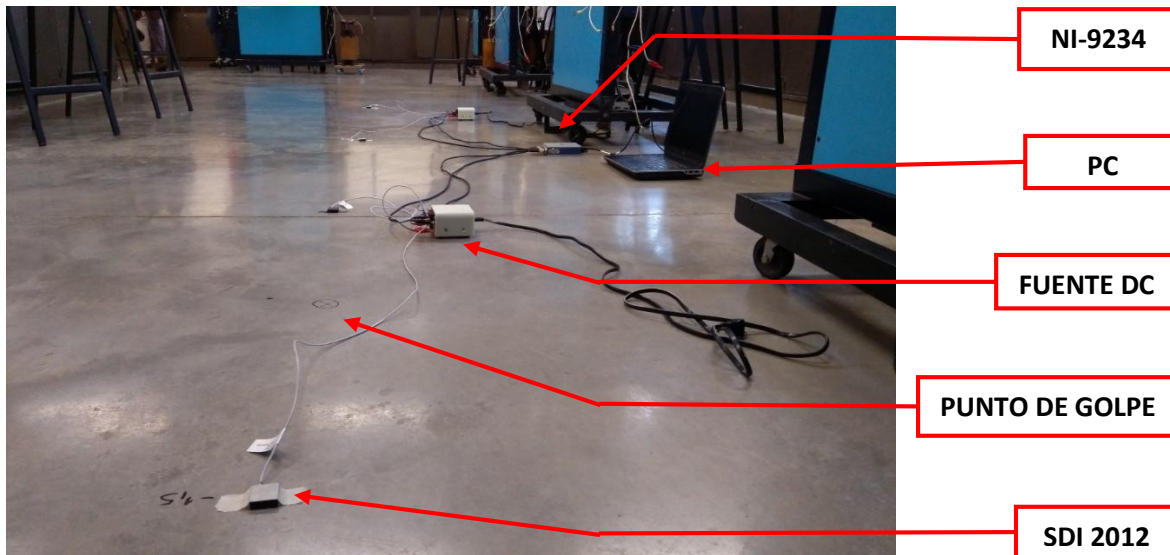
Figura 50. Señales captadas por sensor 1, primer experimento.



2.3.5.2 ARREGLO EN LABORATORIO DE MÁQUINAS K-102.

La foto 2 muestra el arreglo para los experimentos que involucran los golpes A al F de la figura 52 a la figura 63, desarrollado en el laboratorio de máquinas en donde se detalla la posición de los sensores, fuentes de alimentación, puntos de golpes, tarjeta de adquisición de datos, conexión al computador y las señales Voltajes vs Tiempo entregadas por el software.

Foto 2 Arreglo lineal en el laboratorio de máquinas K-102.



- Distancia entre cada sensor: 1.5 metros.
- Distancia entre fuente y sensor: 0.75 metros
- Golpe con martillo: se realizó en el punto medio entre sensores.

Las datos obtenidos se enviaron al PC con *SignalExpress* y para la toma de estos se configuró un tiempo de 2 Segundos. El tiempo de análisis de las señales se ajustó en un rango de 30 ms. (10:15:17:954-10:15:17:984).

PRIMER GOLPE: Punto A de la figura 52.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 53.
 - Sensor 1: 0.7 ms / 2.77 V
 - Sensor 2: 1.7 ms / 2.385 V
 - sensor 3: 2.2 ms / 2.738 V
 - Sensor 4: 3.5 ms / 2.81 V

Figura 51. Golpe A, segundo experimento.

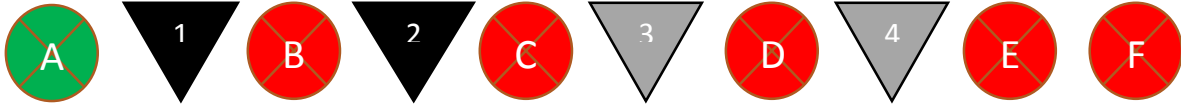
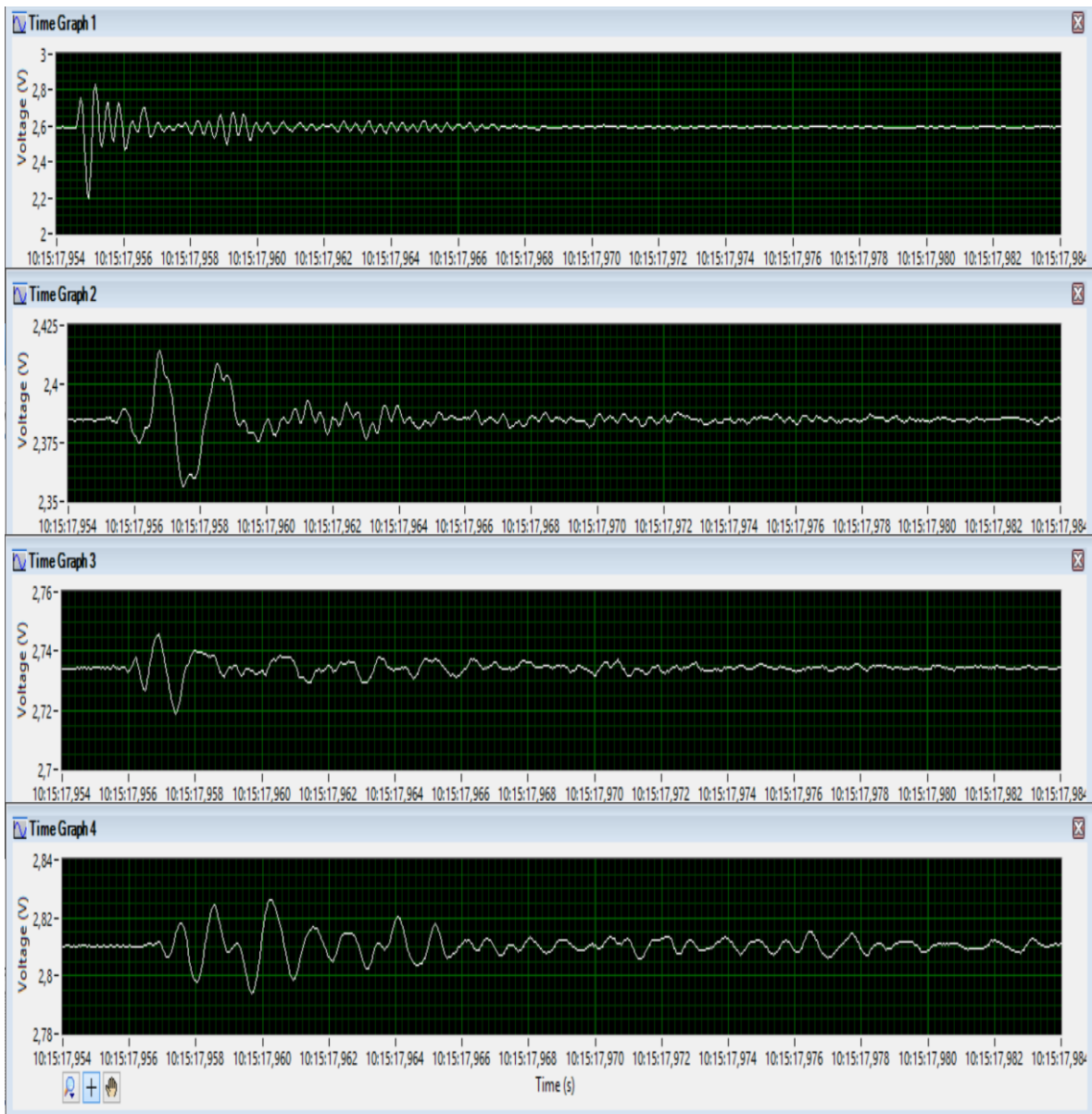


Figura 52. Señales del golpe A, segundo experimento.



SEGUNDO GOLPE: Punto B de la figura 54 .

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 55.
 - Sensor 1: 1.1 ms / 2.75 V
 - Sensor 2: 1.4 ms / 2.4 V
 - sensor 3: 1.8 ms / 2.737 V
 - Sensor 4: 2.6 ms / 2.81 V

Figura 53. Golpe B, segundo experimento.

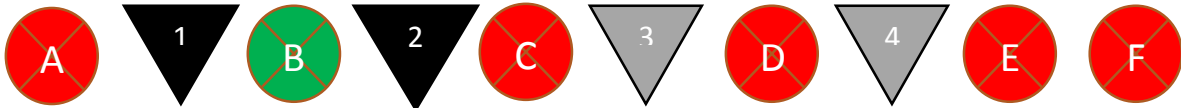
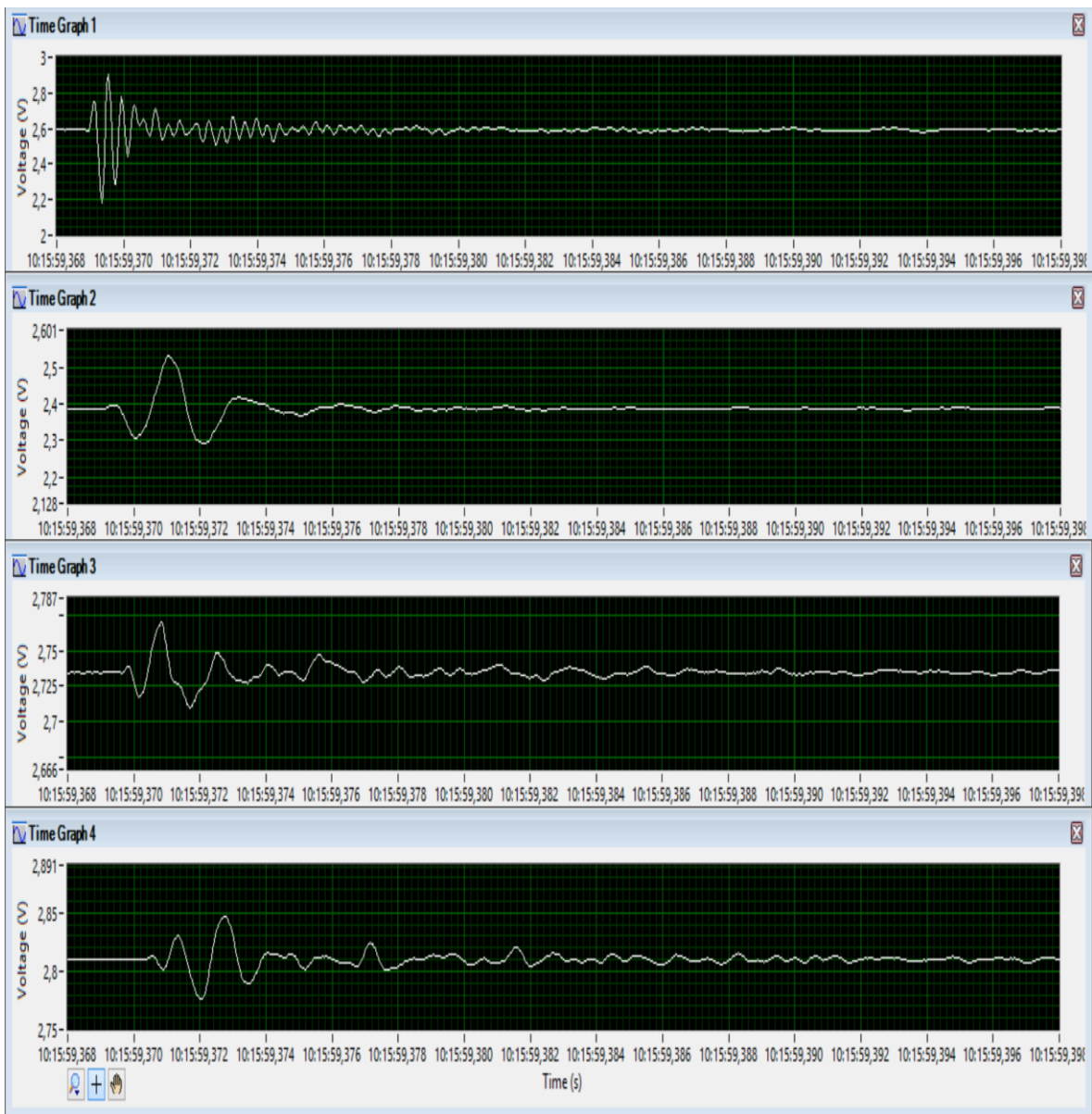


Figura 54. Señales del golpe B, segundo experimento.



TERCER GOLPE: Punto C de la figura 56.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 57.
 - Sensor 1: 1.4 ms / 2.595V
 - Sensor 2: 1 ms / 2.475 V
 - sensor 3: 0.8 ms / 2.85 V
 - Sensor 4: 1.5 ms / 2.85 V

Figura 55. Golpe C, segundo experimento.

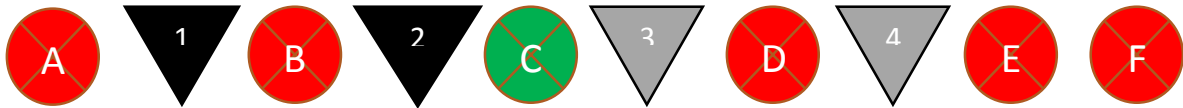
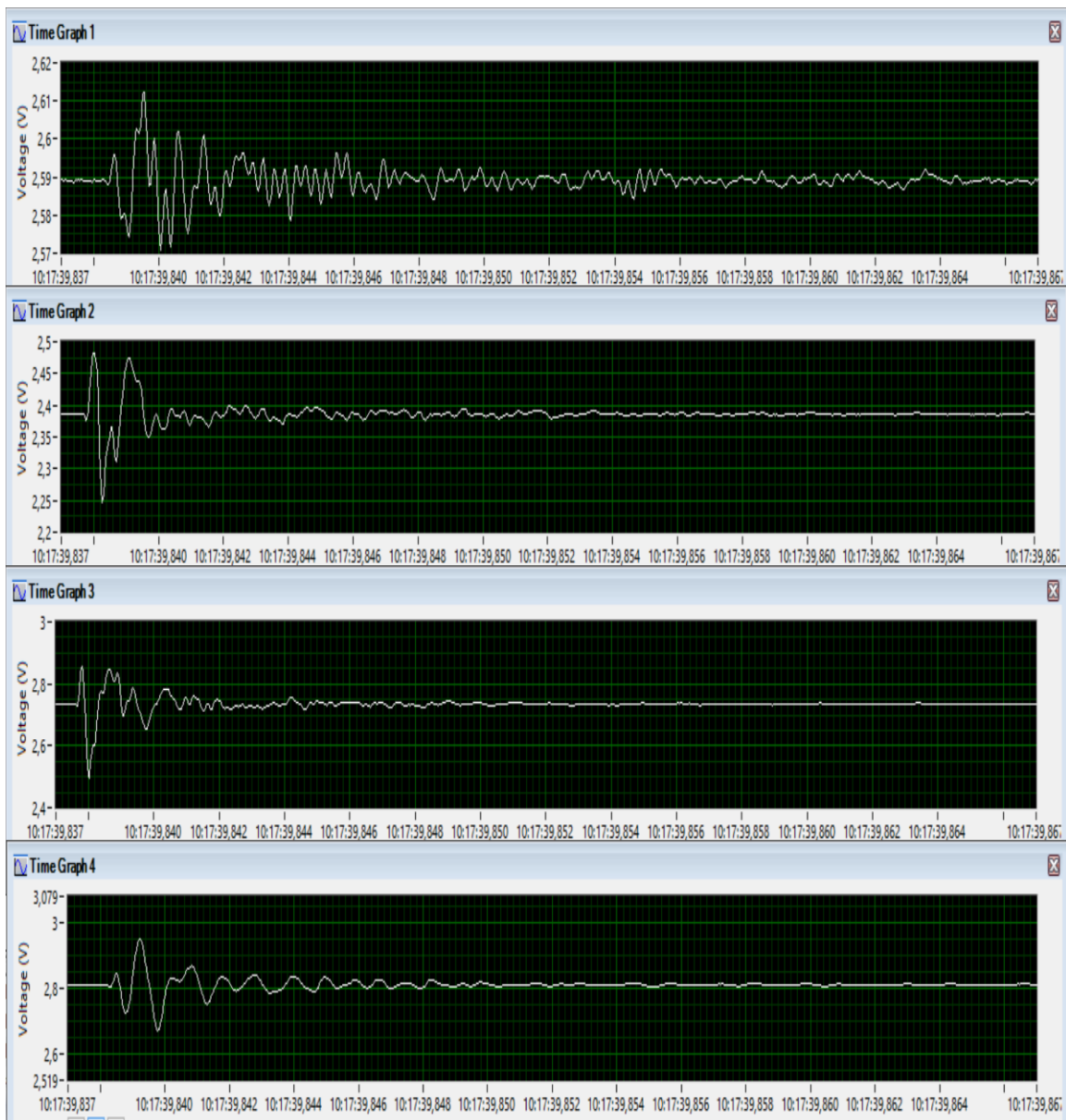


Figura 56. Señales del golpe C, segundo experimento.



CUARTO GOLPE: Punto D de la figura 58.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 59.
 - Sensor 1: 2.4 ms / 2.592 V
 - Sensor 2: 1.7 ms / 2.425 V
 - sensor 3: 0.9 ms / 2.875 V
 - Sensor 4: 0.9 ms / 2.9 V

Figura 57. Golpe D, segundo experimento.

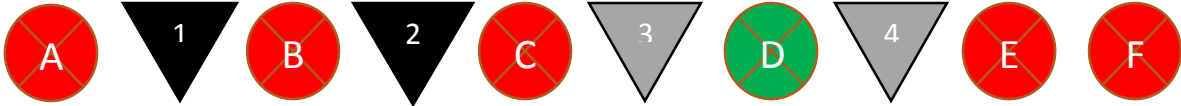
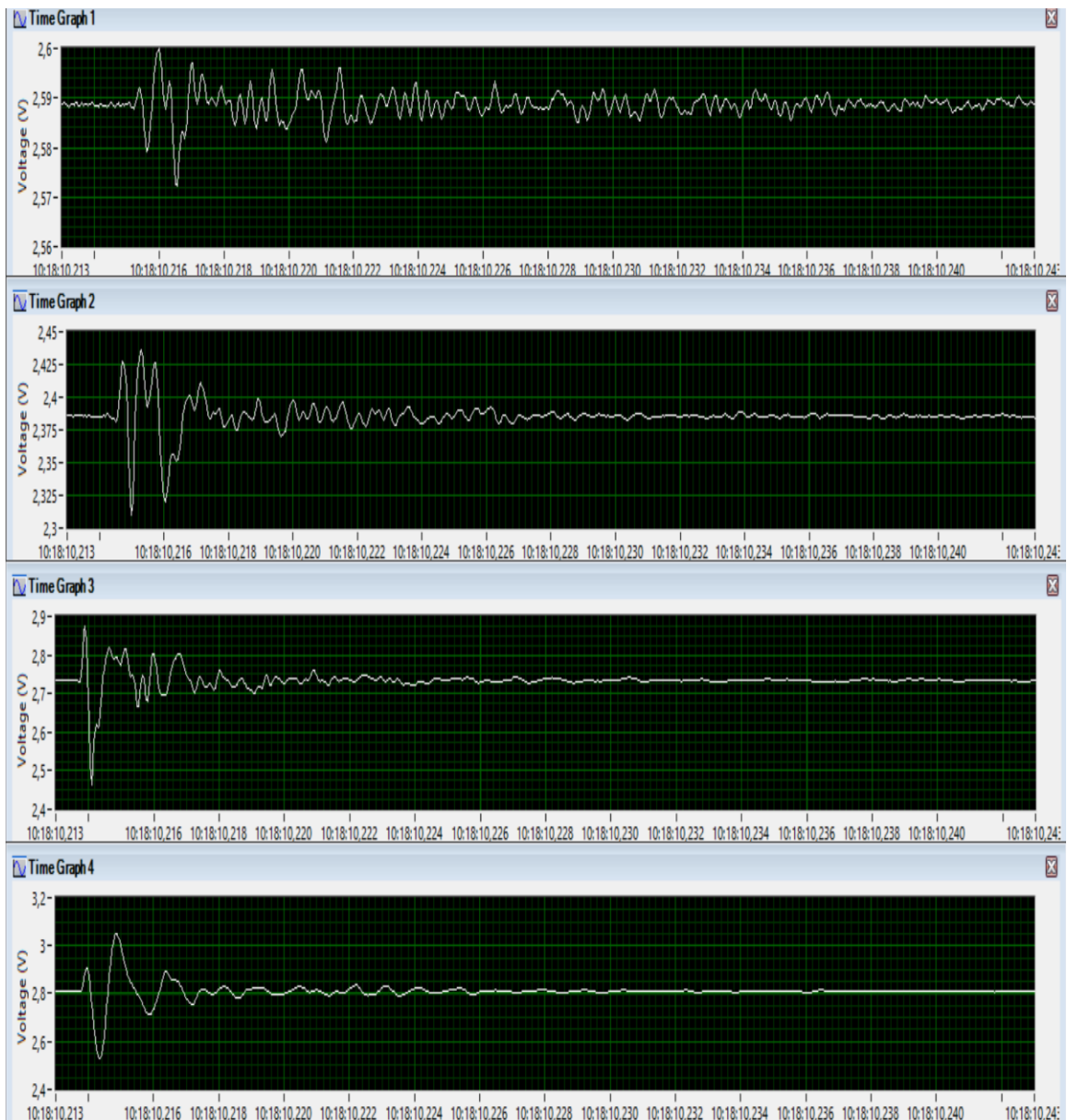


Figura 58. Señales del golpe D, segundo experimento.



QUINTO GOLPE: Punto E de la figura 60.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 61.
 - Sensor 1: 3.2 ms / 2.592V
 - Sensor 2: 2.5 ms / 2.41 V
 - sensor 3: 1.6 ms / 2.8 V
 - Sensor 4: 1.1 ms / 2.95 V

Figura 59. Golpe E, segundo experimento.

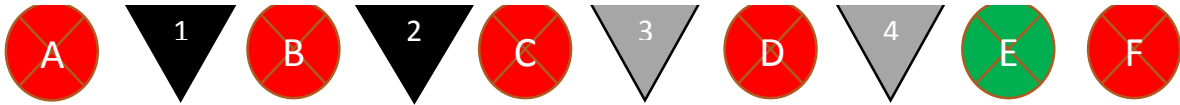
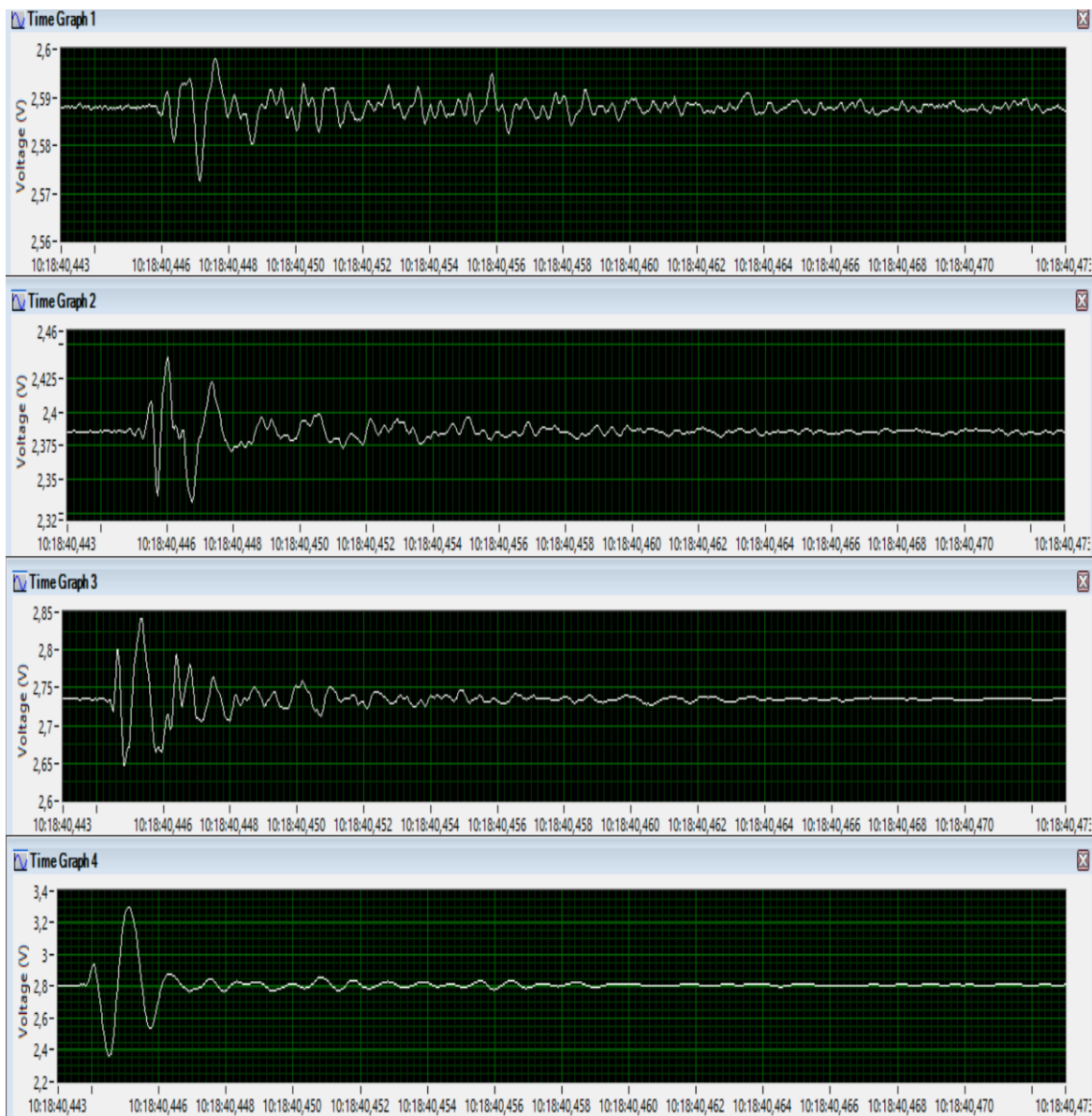


Figura 60. Señales del golpe E segundo experimento.



SEXTO GOLPE: Punto F de la figura 62.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 63.
 - Sensor 1: 3 ms / 2.588 V
 - Sensor 2: 2 ms / 2.39 V
 - sensor 3: 1.6 ms / 2.745 V
 - Sensor 4: 0.8 ms / 2.82 V

Figura 61. Golpe F, segundo experimento.

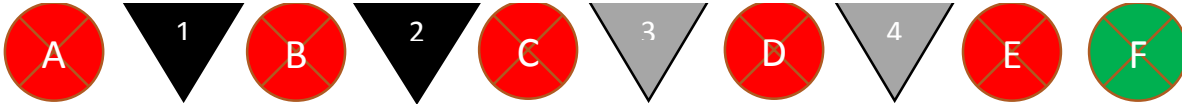
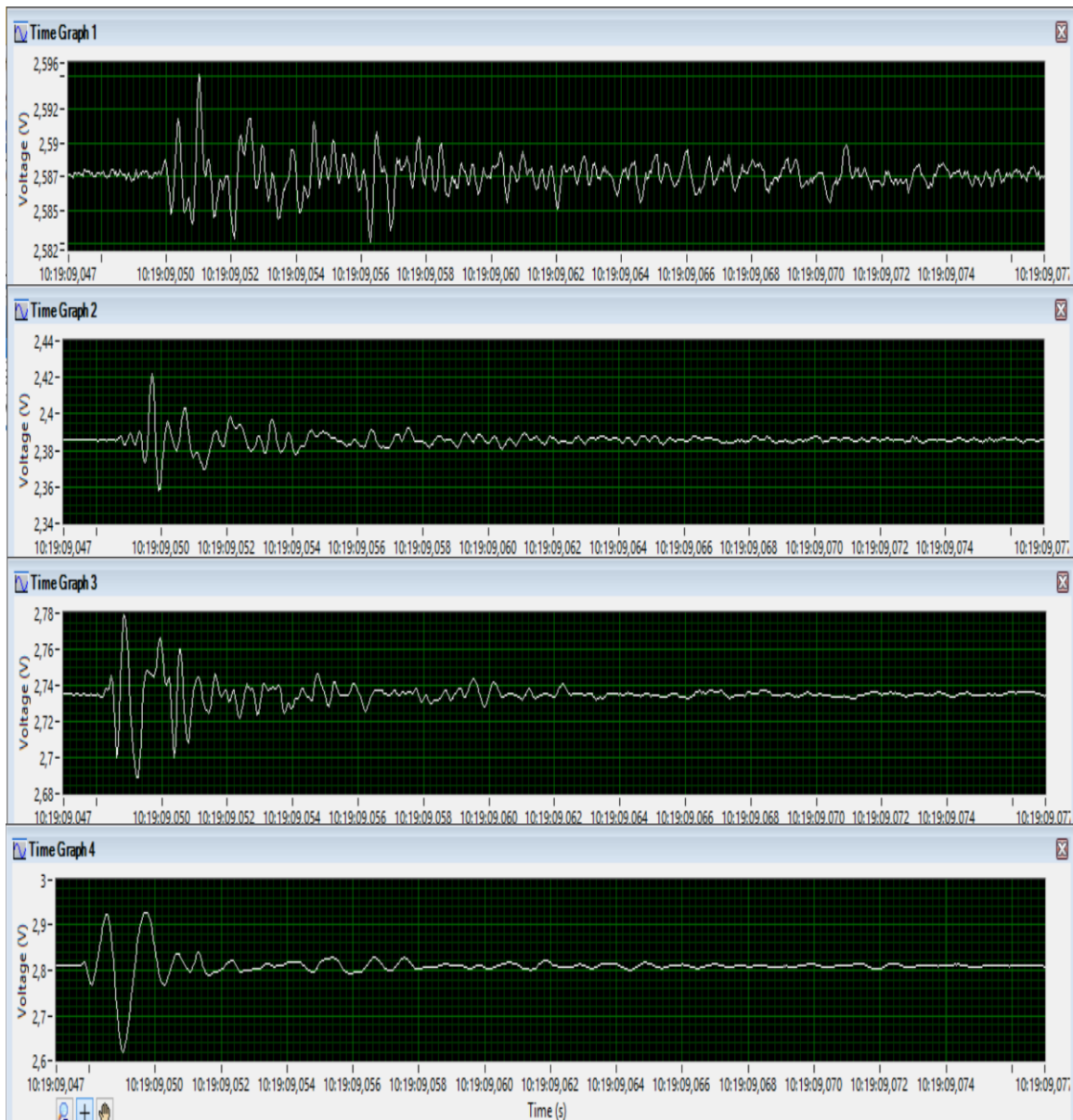
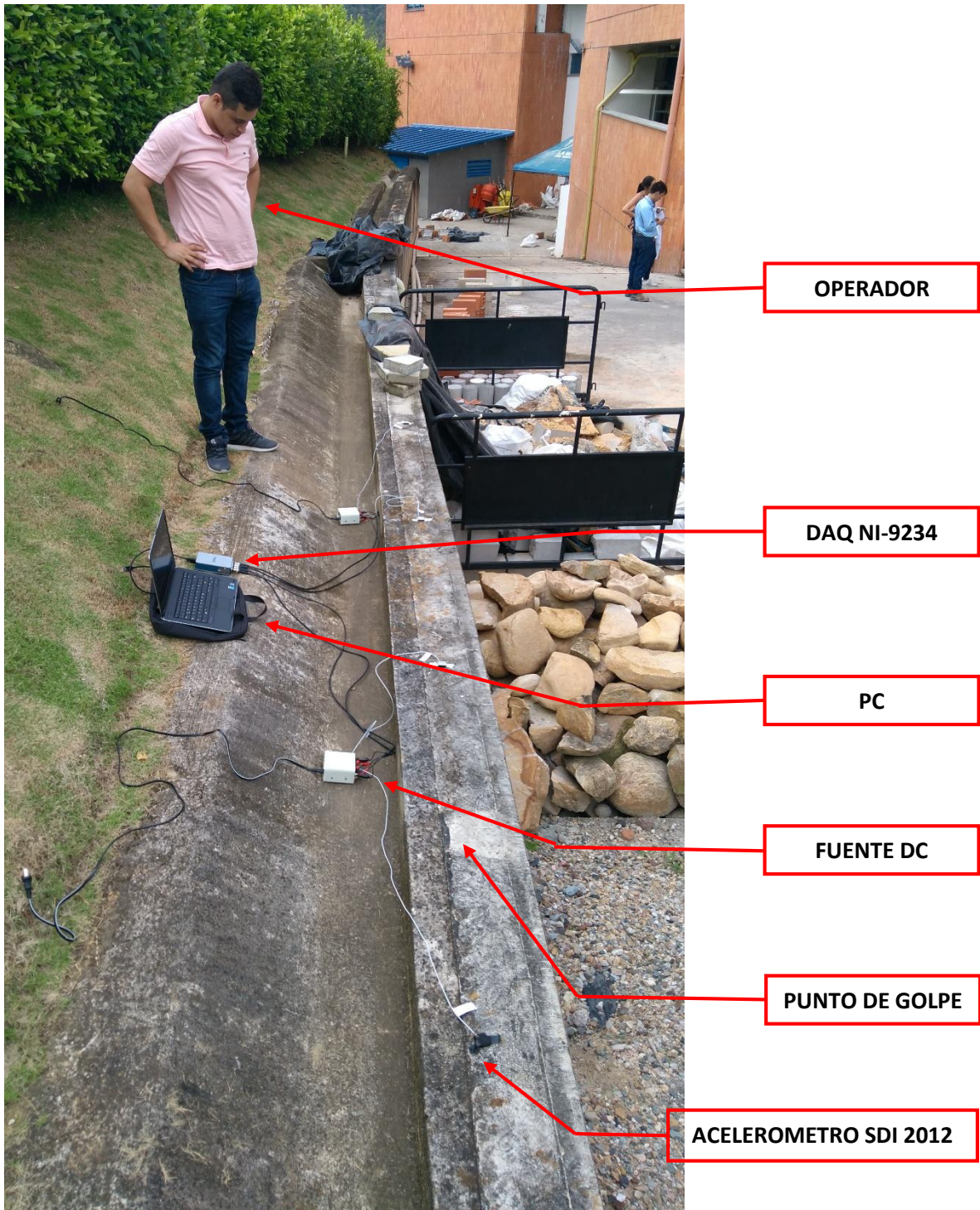


Figura 62. Señales del golpe F, segundo experimento.



2.3.5.3 ARREGLO EN CAMPO.

Foto 3 Arreglo lineal en el laboratorio de construcciones k-106.



La foto 3 muestra el arreglo para los experimentos que involucran los golpes A al F de la figura 65 a la figura 75, desarrollado en el laboratorio de construcciones en donde se detalla la posición de los sensores, fuentes de alimentación, puntos de golpes, tarjeta de adquisición de datos, conexión al computador y las señales Voltajes VS Tiempo entregadas por el software.

- Distancia entre cada sensor:1.5 metros.
- Distancia entre fuente y sensor: 0.75 metros
- Golpe con martillo: se realizó en el punto medio entre sensores.

Las datos obtenidos se enviaron al PC con *SignalExpress* y para la toma de estos se configuró un tiempo de 2 Segundos. El tiempo de análisis de las señales se ajustó en un rango de 21 ms. (15:41:20:289-15:41:20:310).

PRIMER GOLPE: Punto A de la figura 64.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 65.
 - Sensor 1: 0.8 ms / 2.925 V
 - Sensor 2: 1.5 ms / 2.85 V
 - sensor 3: 2.2 ms / 2.75 V
 - Sensor 4: 2.8 ms / 2.63 V

Figura 63. Golpe A, tercer experimento.

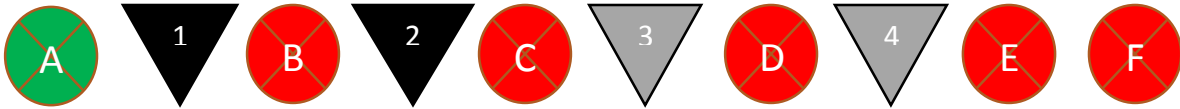
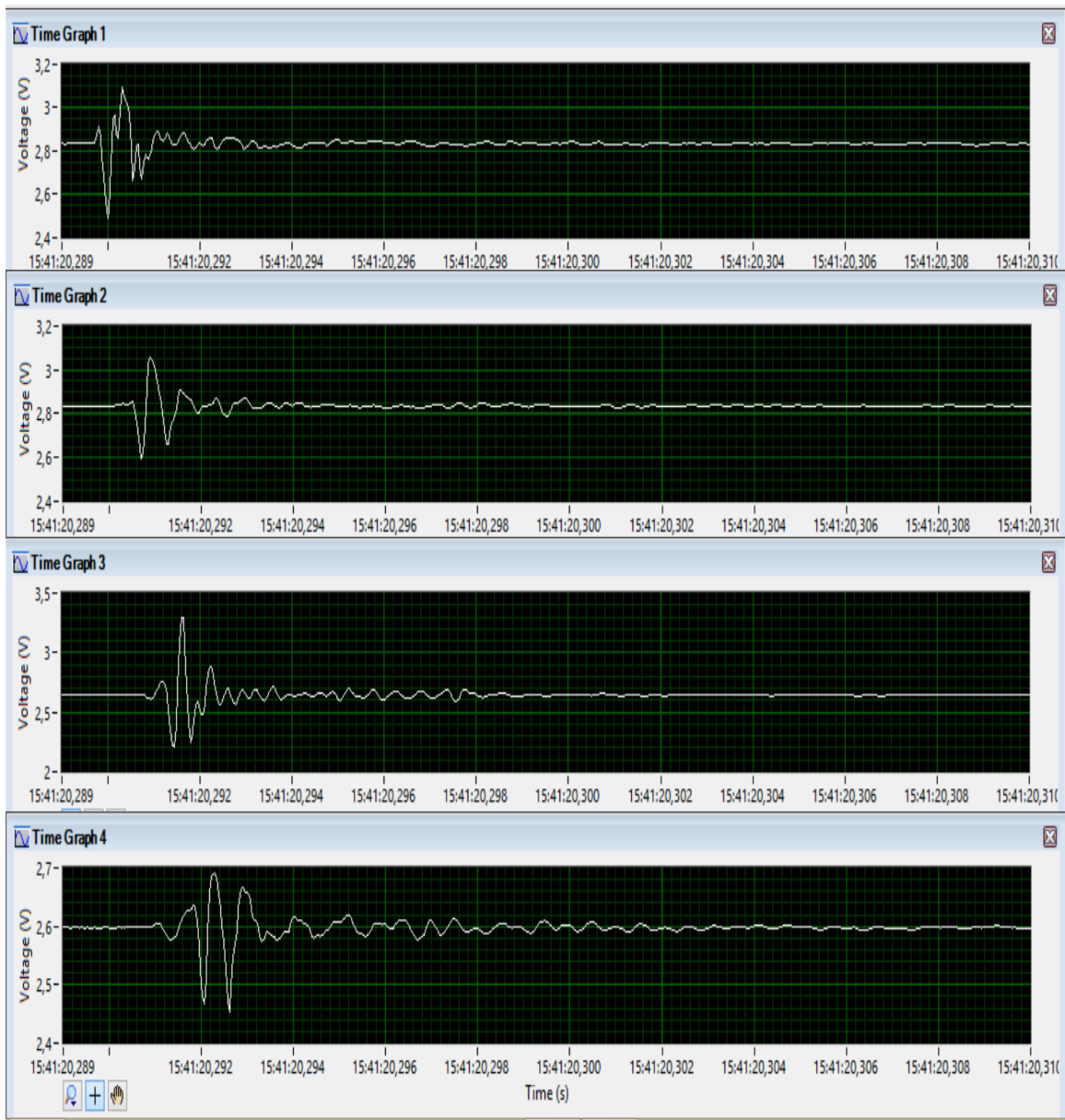


Figura 64. Señales del golpe A, tercer experimento.



SEGUNDO GOLPE: Punto B de la figura 66.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 67.
 - Sensor 1: 0.4 ms / 2.88 V
 - Sensor 2: 0.4 ms / 2.8 V
 - sensor 3: 1.1 ms / 2.7 V
 - Sensor 4: 1.7 ms / 2.62 V

Figura 65. Golpe B, tercer experimento.

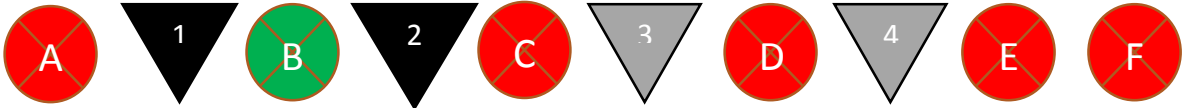
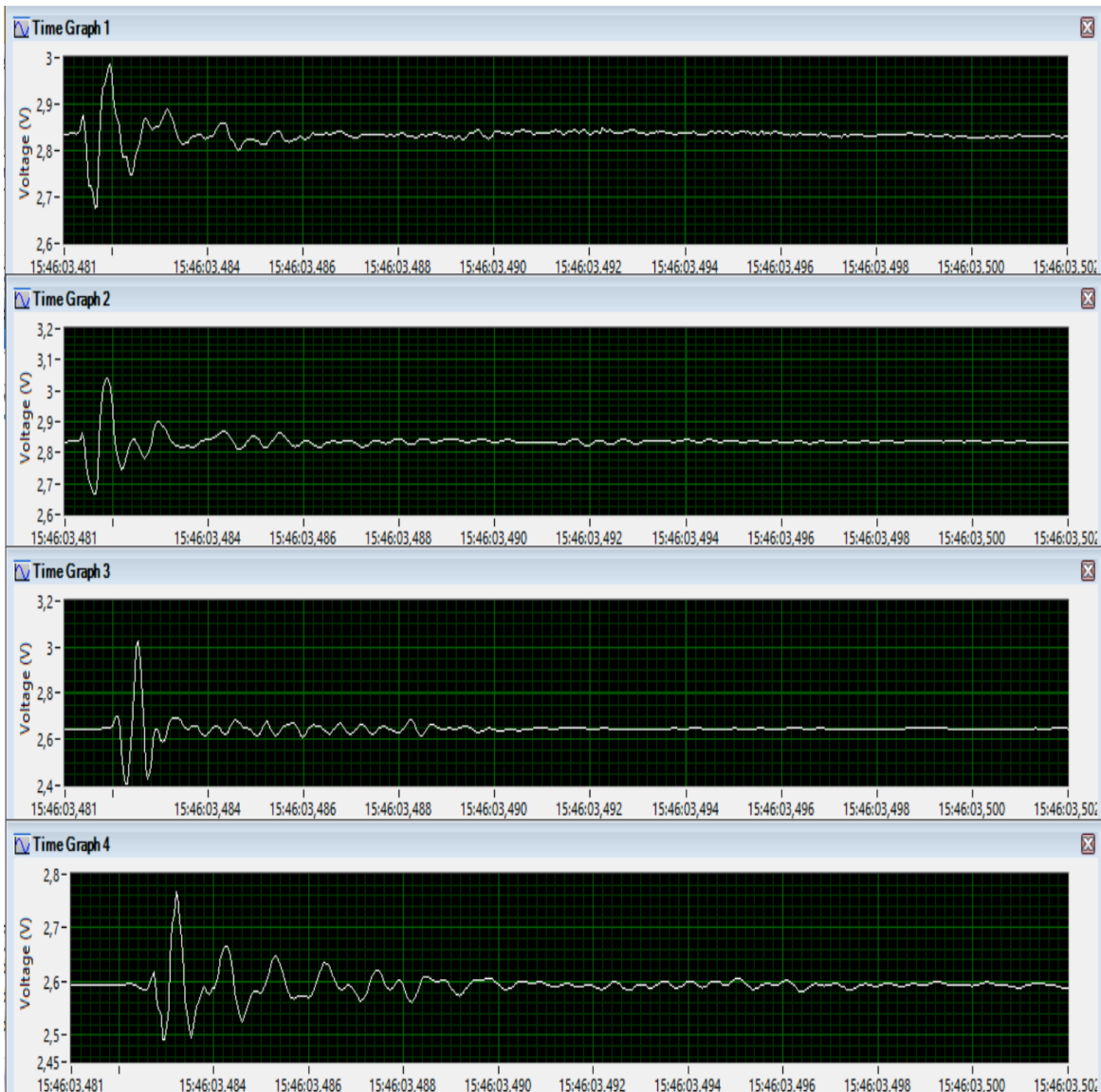


Figura 66. Señales del golpe B, tercer experimento.



TERCER GOLPE: Punto C de la figura 68.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 69.
 - Sensor 1: 1 ms / 2.9 V
 - Sensor 2: 0.3 ms / 2.86 V
 - sensor 3: 0.3 ms / 2.74 V
 - Sensor 4: 0.9 ms / 2.625 V

Figura 67 Golpe C, tercer experimento.

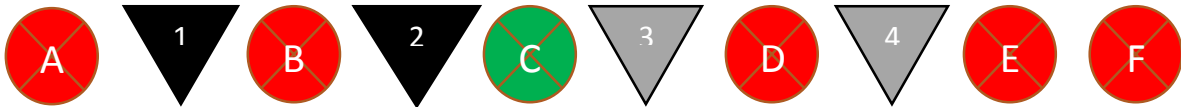
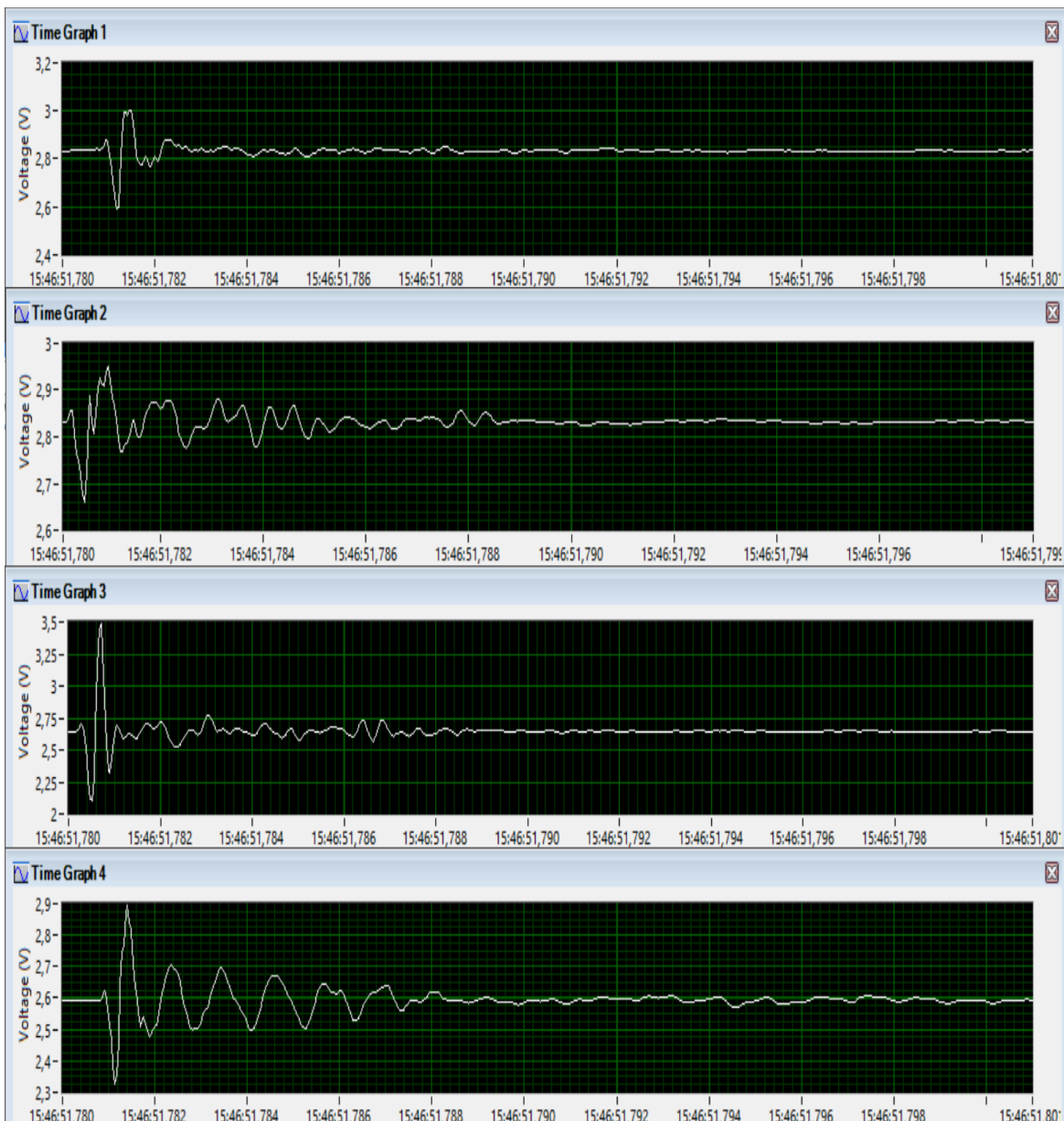


Figura 68. Señales de golpe C, tercer experimento.



CUARTO GOLPE: Punto D de la figura 70.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 71.
 - Sensor 1: 1.8 ms / 2.95 V
 - Sensor 2: 1.1 ms / 2.95 V
 - sensor 3: 0.4 ms / 2.75 V
 - Sensor 4: 0.4 ms / 2.74 V

Figura 69. Golpe D, tercer experimento.

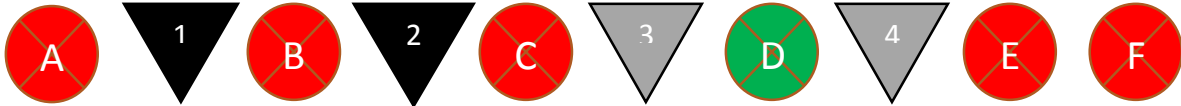
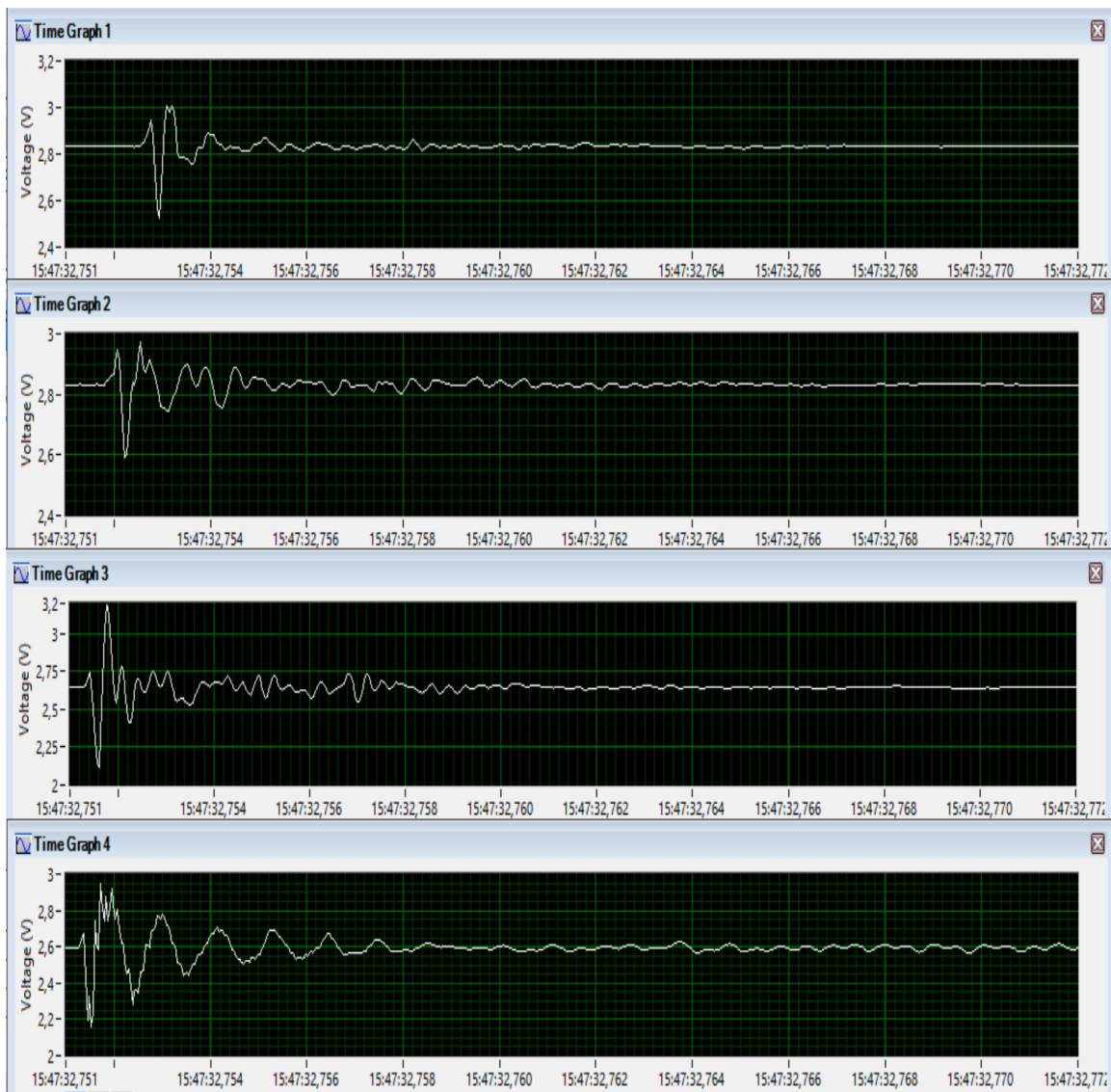


Figura 70. Señales del golpe D, tercer experimento.



QUINTO GOLPE: Punto E de la figura 72.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 73.
 - Sensor 1: 2.6 ms / 2.86 V
 - Sensor 2: 1.9 ms / 2.9 V
 - sensor 3: 1.2 ms / 2.73 V
 - Sensor 4: 0.6 ms / 2.64 V

Figura 71. Golpe E, tercer experimento.

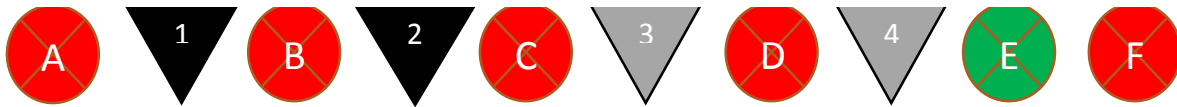
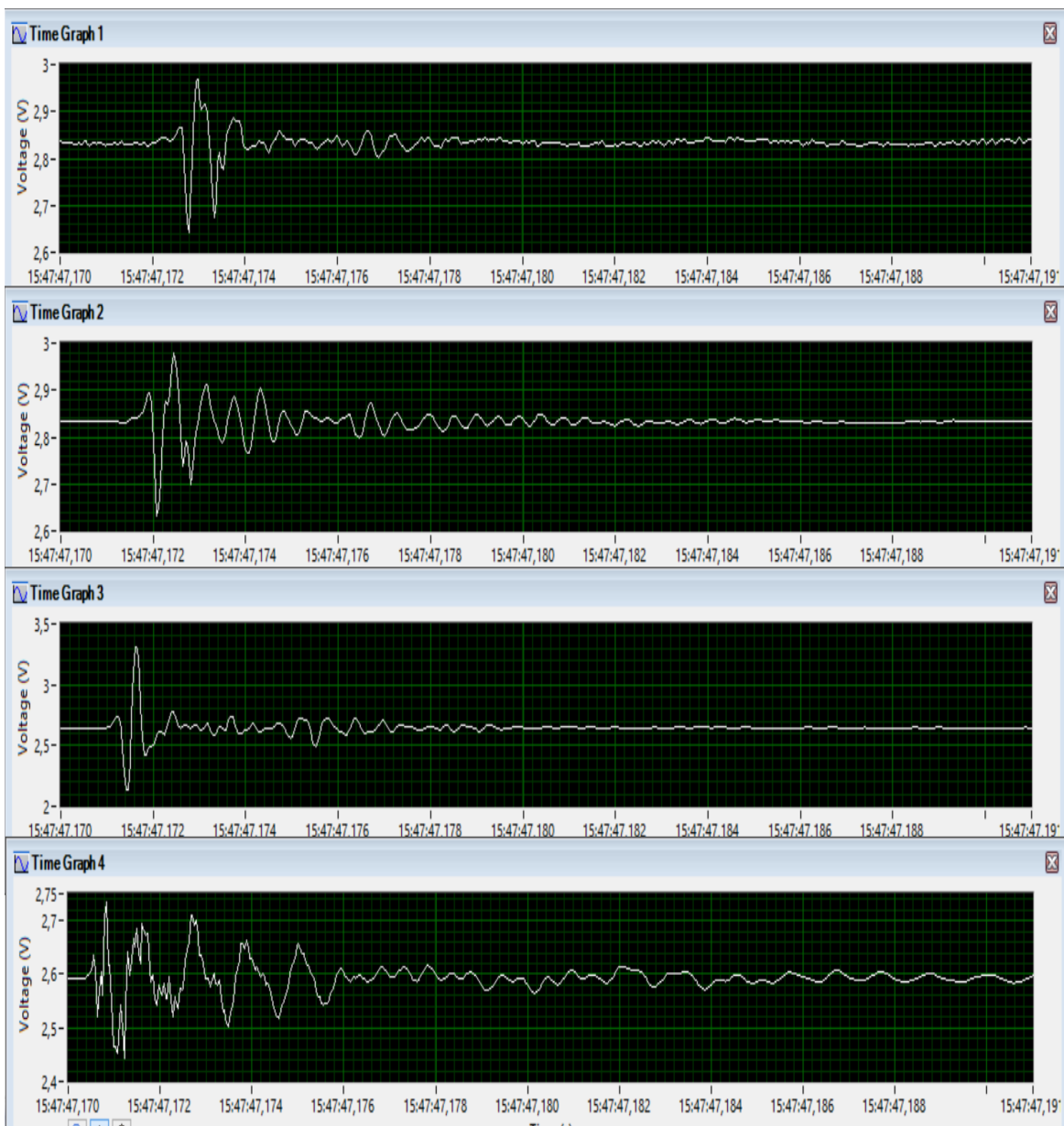


Figura 72. Señales del golpe E, tercer experimento.



SEXTO GOLPE: Punto F de la figura 74.

- Tiempos de llegada y niveles de Voltajes para el primer arribo. Figura 75.
 - Sensor 1: 3.2 ms / 2.86 V
 - Sensor 2: 2.6 ms / 2.87 V
 - sensor 3: 1.8 ms / 2.7 V
 - Sensor 4: 1 ms / 2.65 V

Figura 73. Golpe F, tercer experimento.

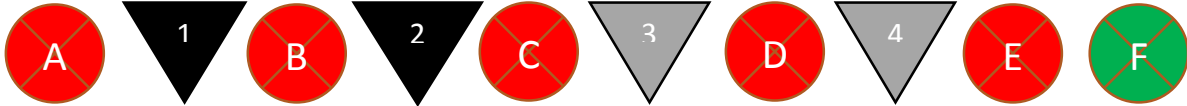
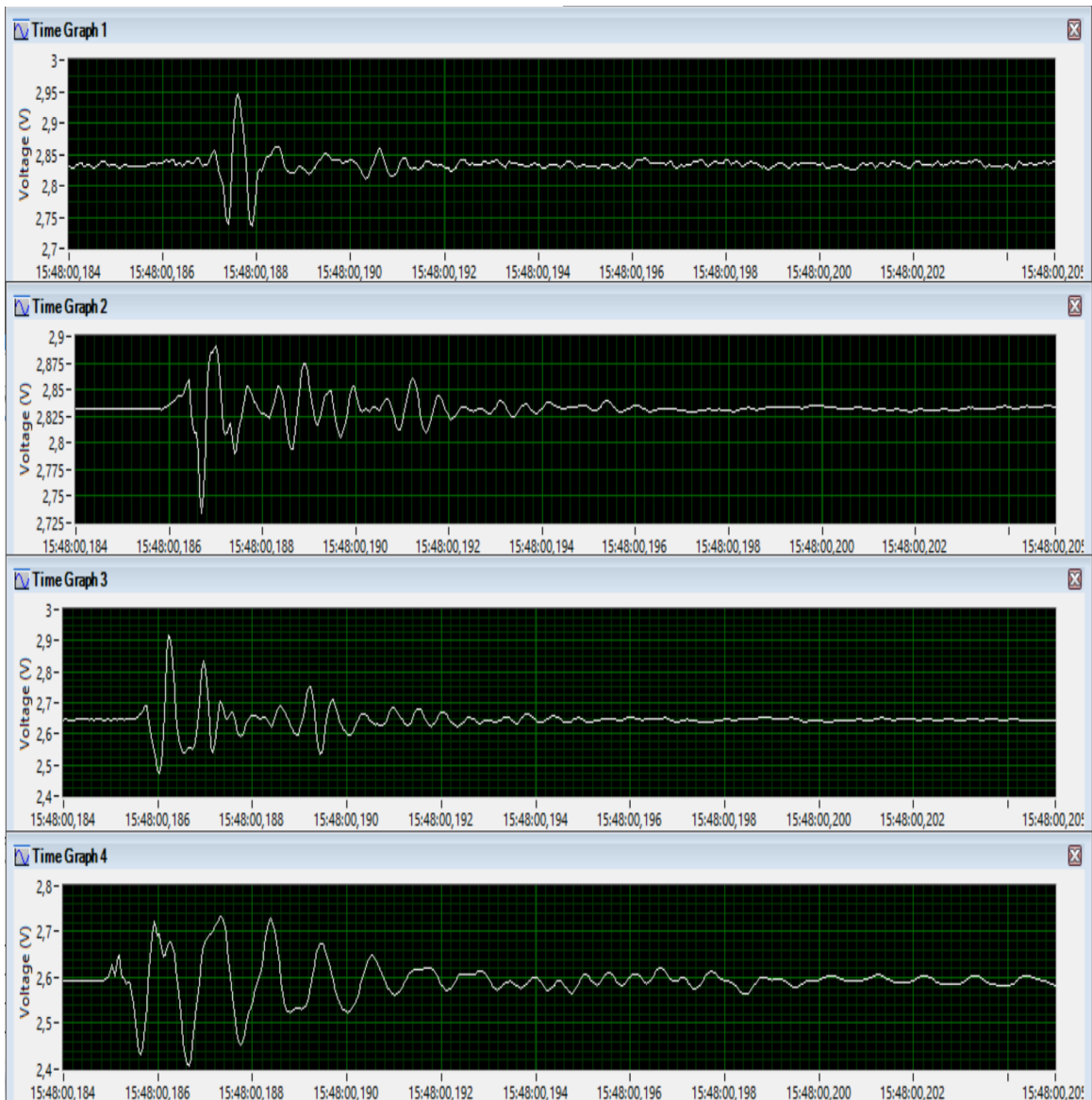


Figura 74. Señales del golpe F, tercer experimento.



2.3.5.4. ARREGLO PARA CAPTAR SEÑAL CON ECXITACIÓN PERPENDICULAR Y LATERAL.

Figura 75. Golpe A, cuarto experimento.



Figura 76. Señal del sensor 1 del golpe A (perpendicular), cuarto experimento.

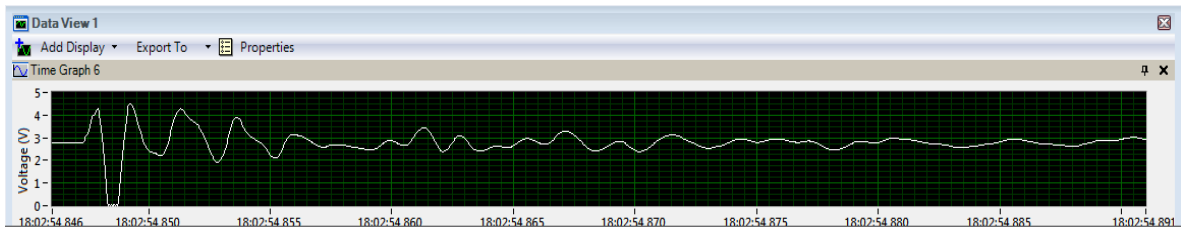


Figura 77. Señal del sensor 2 del golpe A (perpendicular), cuarto experimento.

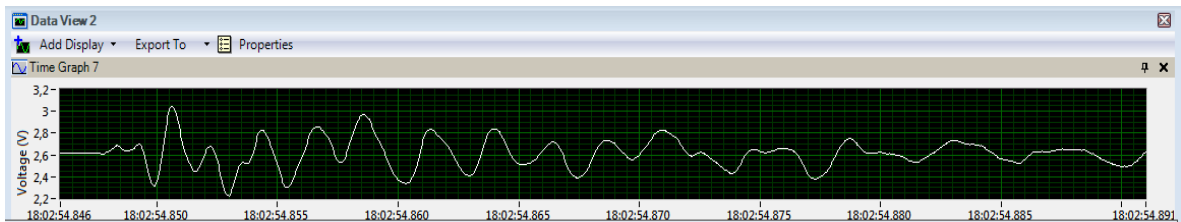


Figura 78. Señal del sensor 1 del golpe A (lateral), cuarto experimento.

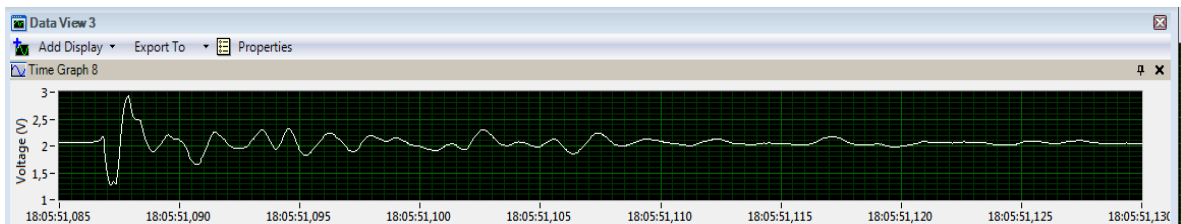
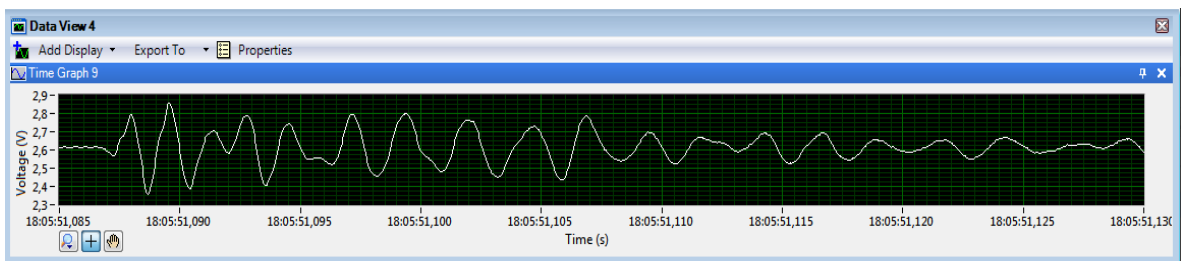


Figura 79. Señal del sensor 2 del golpe A (lateral), cuarto experimento.



La figura 77 se obtuvo de un experimento en la mesa 3 del laboratorio de comunicaciones en el k-309 con un golpe perpendicular a 30 cm del sensor 1 y a 90 cm del sensor 2 buscando diferenciar una onda P de onda S. De manera intuitiva se puede decir que el primer arribo es de la onda P ($t=18:02:54:848$) y en el ($t=18:02:54:861.25$) la onda S debido a que la vibración de la mesa para el primer tiempo se considera longitudinal y para el segundo, transversal.

La figura 79 se obtuvo del experimento en la mesa del laboratorio con un golpe lateral a 30 cm del sensor 1 y a 90 cm del sensor 2 para observar si la onda transversal se podía distinguir de la onda longitudinal con el comportamiento observado en la figura 77. También para este caso de manera intuitiva se puede decir que la onda S aparece en ($t=18:05:51:107.5$).

En el experimento de las figuras 77 a las figuras 80 se pudo observar que para el golpe perpendicular o lateral el comportamiento de los sensores es el mismo, pruebas que no se pudieron realizar en los laboratorios debido a que no se podían dar golpes laterales. Igualmente para este experimento las figuras 76 y 80 no aportaron resultados útiles.

2.3.5.4. COMPARACIÓN VISUAL DEL COMPORTAMIENTO DE LOS GEÓFONOS Y DE LOS ACELERÓMETROS

Figura 80. Señales de acelerómetros

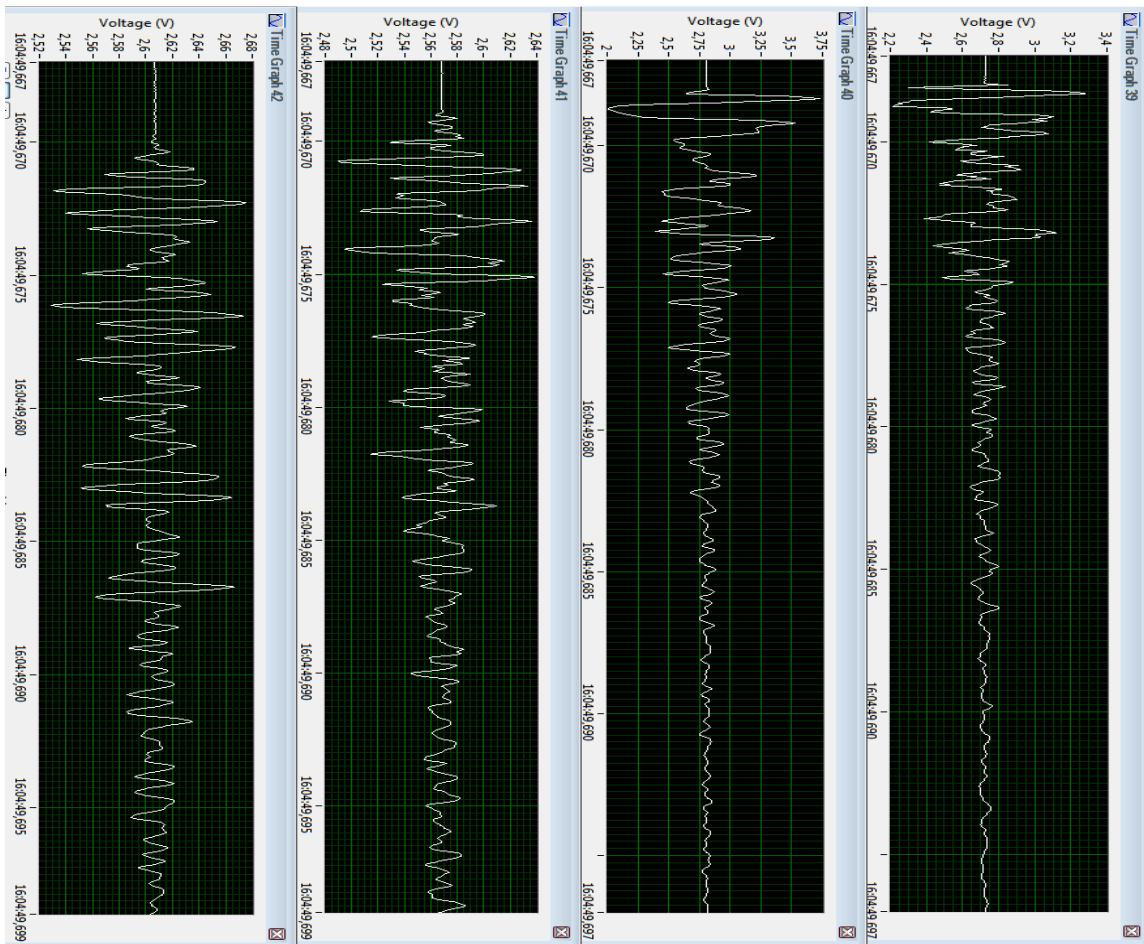
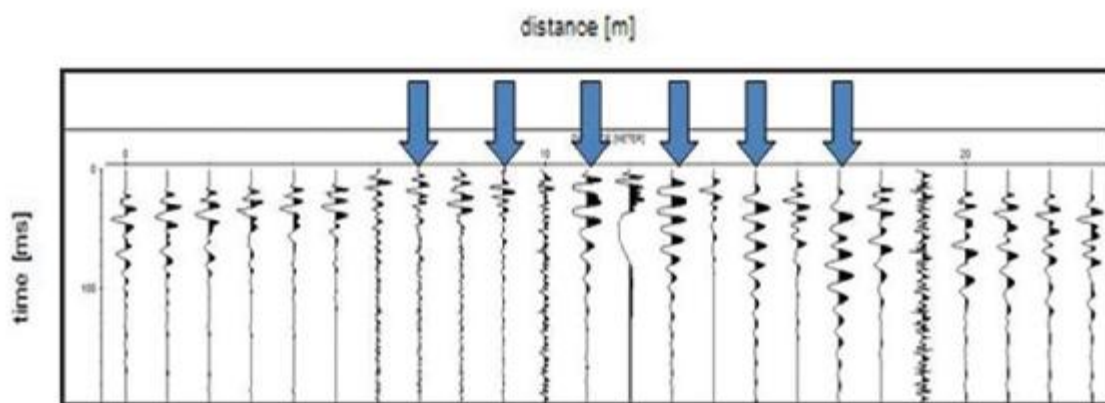


Figura 81. Señales de geófonos.



Fuente: Dagert, J.M., Choy, J., Aranguren, R., Cerrada, M., Klarica, S. 2015. Determinación de velocidades P y S de las unidades rocosas aflorantes en el área metropolitana de Mérida, Venezuela. Boletín de Geología, 37 (1): 75-81.

La figura 82 es el resultado de una de las pruebas realizadas en el campus de la Facultad de Ciencias de la Universidad Los Andes. De manera particular se hicieron dos tipos de pruebas, las primeras con los geófonos directamente en el suelo y las segundas insertados en bloques de cemento. “En ambos casos, los resultados muestran que los bloques no afectan de manera significativa la primera llegada”.

Comparando las pruebas realizadas en la Universidad de los Andes con el desarrollo de este trabajo de grado figura 81 se encuentran similitudes que permiten concluir que el comportamiento de los acelerómetros se asemeja al de los geófonos para una primera interpretación del comportamiento de las ondas mecánicas. Se cumple parte de los objetivos de este trabajo de grado el cual era presentar a los estudiantes del laboratorio de física de ondas una de las aplicaciones industriales mencionadas en la introducción.

3. CONCLUSIONES

- Durante el desarrollo del proyecto los dispositivos se comportaron de acuerdo a las características proporcionadas por los fabricantes, muestra de ello los valores encontrados en la caracterización de los acelerómetros.
- En las imágenes capturadas de los experimentos se evidencia el modo de propagación de las ondas, de acuerdo a la ubicación del sensor y el punto de golpe: si el sensor está más cerca recibirá la perturbación más rápido que el sensor más lejano.
- Los tiempos del primer arribo para los experimentos realizados en el K-309 y en el laboratorio de máquinas k-102 están entre 0.75 y 2 ms.
- Las amplitudes dadas en magnitud de voltaje están comprendidas entre 2.5 y 4V para todos los experimentos.
- El ruido observado en el laboratorio de máquinas K-102 fue mayor a de los otros experimentos, esto debido al tráfico de personas en el corredor de dicho laboratorio y el trafico vehicular en el costado norte, lo cual generaba vibraciones no deseadas que fueron captadas por los sensores.
- En el experimento realizado en el laboratorio de construcciones de ingeniería civil, se observó una diferencia en los tiempos de llegada los cuales fueron menores y también se captó menos ruido debido a la compactación de la estructura en donde se fijaron los acelerómetros.
- Las pruebas realizadas con el grupo de estudiantes permitieron depurar el procedimiento desarrollado en las guías, y quedaron lo suficientemente claras y de manera secuencial para ser desarrolladas en el laboratorio de física de la universidad como complemento a la asignatura de ondas permitiéndole al estudiante comparar el fenomeno clásico de la onda con el observado en los acelerómetros utilizados en este proyecto.

4. BIBLIOGRAFÍA

1. Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2004). Física para ciencia e ingenierías (6a ed., Vol. 1). Mexico: Thomson.
2. Wilson, J. D. (1991). Física con aplicaciones. México: McGraw-Hill. 1982.
3. Universidad central de Venezuela. (s.f.). Guía de prospección sísmica por refracción. Facultad de ingeniería. Escuela de minas y geofísica. Departamento de ingeniería geofísica. Disponible en: <http://www.geocities.ws/geofisicaucv/Archivos/refracc4.pdf> Citado el 29/11/2017.
4. Métodos Sísmicos. http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3404/7/41205_7.pdf. Citado el: 05/06/2014.
5. Geofono. <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/g/geophone.aspx> Citado el: 01/03/2018.
6. Agustín Leobardo Herrera May, Á. R. (mayo-agosto de 2009). Microacelerómetros para la industria automotriz. La ciencia y el hombre: REVISTA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA DE LA UNIVERSIDAD VERACRUZANA, XXII (2). Obtenido de <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol22num2/articulos/microace/index.htm> Citado el: 15/12/2017.
7. Circelli, G. (12 de febrero de 2015). Acelerómetros de 3 ejes, lo que necesitas saber. Recuperado el 18 de 12 de 2017, de panamahitek: <http://panamahitek.com/acelerometros-de-3-ejes-lo-que-necesitas-saber/>.
8. Marta Arenas Mas. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE ACELERACIONES CON PROCESAMIENTO MEDIANTE MICROCONTROLADOR [en línea]. Proyecto fin de carrera. Universidad De Sevilla. Escuela Técnica Superior De Ingenieros. Departamento De Ingeniería Electrónica, junio 2008. Capítulo 4. [Consultado: 25 de enero de 2018]. Disponible en Internet: Trabajos y proyectos fin de estudios de la E.T.S.I. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11638/fichero/Capitulo+4.pdf>.
9. SDI Accelerometer Datasheets Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/0B4eVto02URUhSEgwanZUVmpYM1E/view> Citado el 25/01/2018.
10. NI 9234 Datasheets Disponible en: http://www.ni.com/pdf/manuals/374238a_02.pdf Citado el 1/02/2018.
11. Signal Express Disponible en: <http://www.ni.com/labview/signalexpress/> Citado el 1/02/2018.

12. Dagert, J.M., Choy, J., Aranguren, R., Cerrada, M., Klarica, S. 2015. Determinación de velocidades P y S de las unidades rocosas aflorantes en el área metropolitana de Mérida, Venezuela. Boletín de Geología, 37 (1): 75-81.

5. ANEXOS

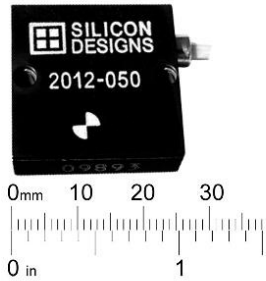
ANEXO 1: *Datasheet Model 2012.*



Model 2012

Low Power Single Axis Accelerometer Module

- Capacitive Micromachined
- Nitrogen Damped
- $\pm 4V$ Differential Output or
0.5V to 4.5V Single Ended Output
- Fully Calibrated
- Low Power Consumption
- -55 to +125EC Operation
- +5V DC Power
- Simple, Four Wire Connection
- Serialized for Traceability
- Responds to DC & AC Acceleration
- Non Standard Ranges Available
- Rugged Black Anodized Aluminum Module



Available G-Ranges

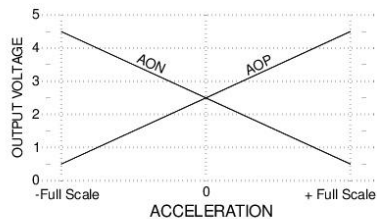
Full Scale Acceleration	Model Number
± 2 g	2012-002
± 5 g	2012-005
± 10 g	2012-010
± 25 g	2012-025
± 50 g	2012-050
± 100 g	2012-100
± 200 g	2012-200
± 400 g	2012-200

DESCRIPTION

The Model 2012 accelerometer module provides a rugged protective case around an integrated SDI low noise accelerometer for measuring accelerations in commercial/industrial environments. It is tailored for zero to medium frequency instrumentation applications. The anodized aluminum case is epoxy sealed and is easily mounted via two #4 (or M3) screws. It is relatively insensitive to temperature changes and gradients. The cable's shield is electrically connected to the case while the ground (GND) wire is isolated from the case. An optional initial calibration sheet (2012-CAL) and periodic calibration checking are also available. Please refer to the Model 2210 for applications that require a lower output impedance or greater power supply rejection ratio than the Model 2012 provides.

OPERATION

The Model 2012 accelerometer module produces two analog voltage outputs, AOP & AON, which vary with acceleration as shown in the graph at right. The signal outputs are fully differential about a common mode voltage of $\frac{1}{2}$ VDD (approximately 2.5 volts). At zero acceleration, the output differential voltage is nominally zero volts; at +full scale acceleration, the output differential voltage is +4 volts; at -full scale acceleration the output differential voltage is -4 volts. The sensitive axis is perpendicular to the bottom of the package, with positive acceleration defined as a force pushing on the bottom of the package.



APPLICATIONS

- VIBRATION MONITORING
- VIBRATION ANALYSIS
- MACHINE CONTROL
- MODAL ANALYSIS
- ROBOTICS
- CRASH TESTING
- INSTRUMENTATION
- ROTATING MACHINERY

SPECIFICATIONS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE



SIGNAL DESCRIPTIONS

VDD and GND (Power): Red and Black wires respectively. Power (+5 Volts DC) and ground. AOP and AON (Output): Green & white wires respectively. AOP voltage increases (AON decreases) with positive acceleration. At zero acceleration, both outputs are nominally equal to 2.5 volts. The device experiences positive (+1g) acceleration with its lid facing up in the Earth's gravitational field. Either output can be used individually or the pair can be used differentially.

PERFORMANCE - By Model: VDD=+5VDC, TC=25°C. Table with columns: MODEL NUMBER, 2012-002, 2012-005, 2012-010, 2012-025, 2012-050, 2012-100, 2012-200, 2012-400, UNITS. Rows include Input Range, Frequency Response, Sensitivity, Output Noise, and Max. Mechanical Shock.

Note 1: Voltages on AOP & AON signal wires may exceed 0.5 volt above or below the supply voltages provided the current is limited to 1 mA.. Note 2: Single ended sensitivity is half of values shown.

PERFORMANCE - All Models: Unless otherwise specified, Vs=+8 to +32VDC, TC=25°C, Differential Mode. Table with columns: PARAMETER, MIN, TYP, MAX, UNITS. Rows include Cross Axis Sensitivity, Bias Calibration Error, Bias Temperature Shift, Scale Factor Calibration Error, Scale Factor Temperature Shift, Non-Linearity, Power Supply Rejection Ratio, Output Impedance, Operating Voltage, Operating Current, Mass, and Cable and connector.

Note 3: 100g versions and above are tested from -65g to +65g. Note 4: Tighter tolerances may be available upon request.

DIFFERENTIAL vs SINGLE ENDED OPERATION

The model 2012 accelerometer will provide its best performance when you connect it to your instrumentation in a differential configuration using both the AOP and AON output signals. But a differential connection may not always be possible. In such cases, it is perfectly fine to connect the accelerometer to your instrumentation in single ended mode by connecting AOP and GND to your instrumentation and leaving AON disconnected. Keep in mind however, that for a single-ended connection, the signal to noise ratio is reduced by half, the signal is more susceptible to external noise pickup, and the accelerometers output will vary directly with any change in the +2.5V reference that you provide.

CABLE SPECIFICATIONS & LENGTH CONSIDERATIONS

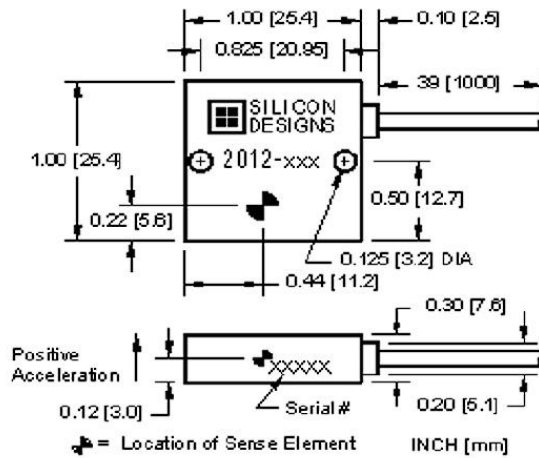
The cable consists of four 26 AWG (7x34) silver plated copper wires with PTFE insulation surrounded by a braided shield. The shield jacket is a PTFE tape wrap with a nominal outer diameter of 0.131". Extending the model 2012's

SPECIFICATIONS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE



Model 2012

one meter cable is not recommended. If you do decide to connect additional cable, we recommend you check each individual installation for oscillation by tapping the accelerometer and watching the differential output for oscillation in the 20kHz to 50kHz region. If no oscillation is present, then the additional cable length being used is OK for that particular device.



SPECIFICATIONS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE

ANEXO 2: Calibración de acelerómetros SDI.

Calibrating Your Accelerometer

Silicon Designs, Inc.

Equipment You Will Need



Voltmeter or Other Signal Measuring Device



Signal Connectors



Power Supply & Connectors



Accelerometer module and ESD precautions

All Silicon Designs accelerometer modules respond to the Earth's gravity and should show approximately 1g of input when stationary and laid flat. It's possible to use this capability to do a static calibration of the device.

In addition to the equipment listed to the left, you will also need the accelerometer's data sheet (available on www.silicondesigns.com) and a calculator.

For this example we will be using a Silicon Designs 2260-025, however these instructions will work for all Silicon Designs modules.

Connect your accelerometer according to the instructions in the Quick Start Guide.

In this example we are using a 9 Volt DC battery, which falls within the +8 to +32 Volt DC range supported by the 2260.

Place the module in the +1G position (lid up) and check the output voltage (Figure A).

Place the module in the -1G position (lid down) and check the output voltage (Figure B).

Calculate the 0G Bias

$\frac{1}{2} \times (+1G \text{ reading} + -1G \text{ reading})$

This 2260 measures $\frac{1}{2} \times (.199 + -.124) = .0375$

Calculate the Scale Factor

$\frac{1}{2} \times ([+1G \text{ reading}] - [-1G \text{ reading}])$

This 2260 measures $\frac{1}{2} \times (.199 - -.124) = .1615$

Calculate the Sensitivity

The data sheet will provide the sensitivity, but the math for figuring out sensitivity is simple. Take the accelerometer's output range value, for example $\pm 4V$, and convert to mV, in this case 4000 mV. Divide that mV number by your sensor's g range, in this case 25g, so $4000/25 = 160mV$. This means that 1 g of acceleration equals 160 mV of output and +/- 1g would be 320 mV.

In this example, the readings were .199 and -.124. Add them together and $|.199| + |-.124| = .323$ Volts DC or 323mV for the entire +/- 1g range.



Figure A



Figure B

ANEXO 3: Manual de prácticas para laboratorio

**MANUAL DE OPERACIONES PARA LA PRÁCTICA EN EL
LABORATORIO**

**ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA
PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS**

GUIA DE LABORATORIO

NICOLÁS ESTEBAN DAZA GONZÁLEZ

YULWARD ANDRES FRAGOZO LIÑAN

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico

M.Sc. Alex Alberto Monclou Salcedo

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA/ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2018

INDICE

PRÁCTICA 1: CARACTERIZAR Y ADAPTAR EL COMPORTAMIENTO DE LOS ACELERÓMETROS.	1
PRÁCTICA 2: CONEXIONES Y RECONOCIMIENTO <i>LABVIEW</i> <i>SIGNALEXPRESS</i>.....	9
PRÁCTICA 3: ARREGLOS BÁSICOS PARA ADQUISICIÓN DE ONDAS	20
PRÁCTICA 4: ACERCAMIENTO A LA EXPLORACIÓN SÍSMICA.....	30

PRÁCTICA 1: Caracterizar y adaptar el comportamiento de los acelerómetros.

1. OBJETIVO

- Reconocer los acelerómetros y su modo de operación.

2. MATERIALES

- Acelerómetros modelo 2012-005, 2012-010
- Fuentes de alimentación
- Multímetro
- Hoja de datos de los dispositivos

3. INTRODUCCIÓN

Los acelerómetros son dispositivos electrónicos capaces de medir el cambio de gravedad en la superficie y orientación en que se encuentren instalados. El proceso de caracterización consiste en determinar las características de dichos dispositivos para compararlas con las proporcionadas por el fabricante.

En esta práctica se caracterizarán los acelerómetros de la marca *Silicon Designs* para encontrar su curva de operación que servirá para el desarrollo de las prácticas.

- Del documento: **ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS**. Consulte 2.3.2 Caracterización y adaptación del comportamiento de los acelerómetros para su uso en el estudio de propagación de ondas.

4. MARCO TEORICO

LA FUERZA G

La fuerza g es una medida de aceleración y está basada en la aceleración que ejerce la gravedad de la Tierra en un objeto cualquiera. Una aceleración de 1g. es considerada como igual a la gravedad, que es de $9.80665 \text{ (m/s}^2\text{)}$. La fuerza g. para un objeto es de 0g. en cualquier ambiente sin gravedad, como una caída libre o un satélite orbitando la Tierra y de 1g. a cualquier objeto estacionario en la superficie de la Tierra al nivel del mar. Adicional a esto, las fuerzas g. pueden ser mayores a 1, como en una montaña rusa, en una centrifugadora o en un cohete.

La aceleración y la fuerza g puede ser expresada en términos más familiares: una aceleración de 1g. es la variación de la velocidad en aproximadamente

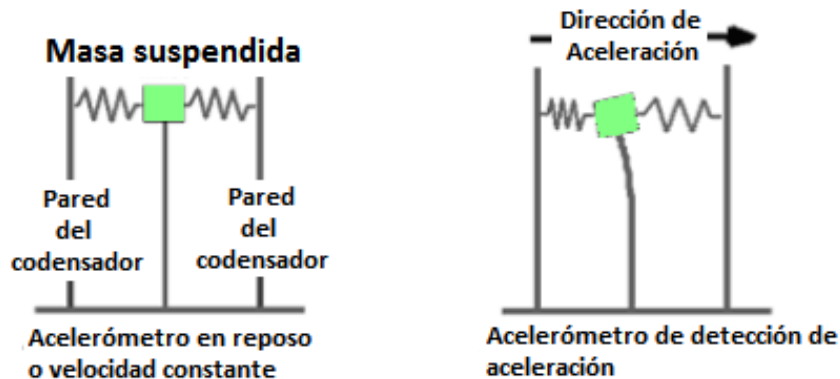
35 km/h por cada segundo. Así, si un automóvil viaja a 105 km/h y frena en un segundo, experimentará una fuerza de 3g. La expresión "1g. 9,80665 m/s²" significa que por cada segundo que pasa, la velocidad varía en 9,80665 m/s (35,30394 km/h). La medición de las fuerzas g. se hace por medio de un acelerómetro.¹

ACELERÓMETROS

Dispositivo electromecánico desarrollado para medir aceleraciones y es útil para sensar las vibraciones y el movimiento en diferentes sistemas. Un acelerómetro mide la fuerza de inercia generada cuando una masa es afectada por un cambio de velocidad y esta fuerza puede variar la tensión de un resorte, la deformación de un elemento, la frecuencia de vibración de una masa o el cambio de la capacidad interna de un dispositivo.

ACELERÓMETROS CAPACITIVOS. En estos se modifica la posición relativa de las placas de un microcondensador de tal manera que la respuesta a la variación de la aceleración varía la capacidad entre conductores como se puede observar en la figura 1.²

Figura 1. Esquema del principio de funcionamiento de un acelerómetro de condensador.



Fuente: Diseño E Implementación De Un Sistema De Adquisición De Aceleraciones Con Procesamiento Mediante Microcontrolador Citado el: 25/01/2018.

SENSOR SILICON DESIGNS 2012. El sensor 2012 es un acelerómetro integrado, de bajo nivel de ruido construido dentro de una carcasa protectora robusta como se muestra en la figura 2. para medir aceleraciones en entornos

¹ Circelli, G. (12 de febrero de 2015). Acelerómetros de 3 ejes, lo que necesitas saber. Recuperado el 18 de 12 de 2017, de panamahitek: <http://panamahitek.com/acelerometros-de-3-ejes-lo-que-necesitas-saber/>

² Marta Arenas Mas. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE ACELERACIONES CON PROCESAMIENTO MEDIANTE MICROCONTROLADOR [en línea]. Proyecto fin de carrera. Universidad De Sevilla. Escuela Técnica Superior De Ingenieros. Departamento De Ingeniería Electrónica, Junio 2008. p. 44. [Consultado: 25 de enero de 2018]. Disponible en Internet: Trabajos y proyectos fin de estudios de la E.T.S.I. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11638/fichero/Capitulo+4.pdf>

comerciales/industriales. Está diseñado para aplicaciones de instrumentación de frecuencia cero a frecuencias cercanas a los 600 Hertz.³

Figura 2. Sensor 2012 *Silicon Designs*.

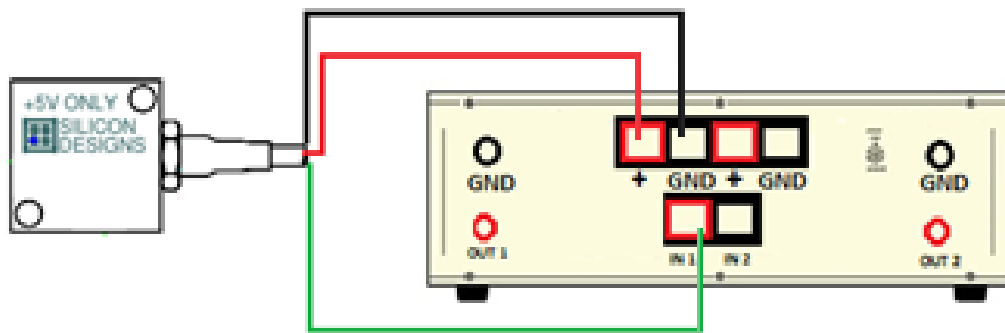


Fuente: *Silicon Designs* Inc.

5. PROCEDIMIENTO

- Conectar el acelerómetro a la Fuente DC de 5V como se muestra en la figura 3 de acuerdo a las convenciones de la tabla 1. (Cable rojo positivo, Cable negro negativo).
- Conectar el cable verde en IN 1.
Nota: Para las señales de voltaje que entrega el acelerómetro fije el multímetro en OUT 1.


Figura 3. Conexión acelerómetro-fuente DC.



³ Data Sheet SDI 2012 Disponible en:
<https://drive.google.com/file/d/0B4eVto2URUhSEgwanZUVmpYM1E/view>

ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS
MANUAL DE OPERACIONES PARA LA PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

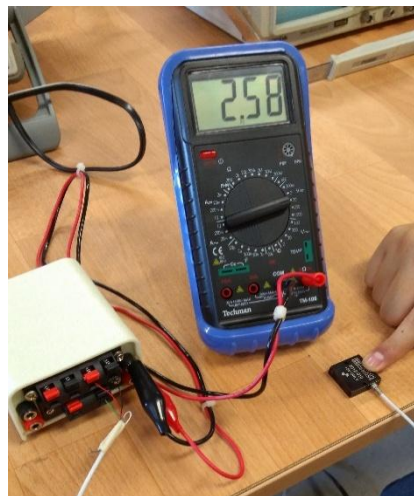
Tabla 1. Convenciones terminales SDI 2012.

+5v: Cable rojo	Arreglo de 4 cables. 
GND: Cable negro	
AOP: cable verde	
AON: cable blanco	

Fuente: *Silicon Designs Inc.*

- Fijar el acelerómetro en la posición + g. (*lid up*-cara superior hacia arriba) y verificar el voltaje de salida análogo (AOP/ cable verde) con respecto a tierra (cable negro) con el multímetro (Figura 4). Llenar la tabla 2 con los valores encontrados.

Figura 4. Verificación del voltaje AOP + g.



- Fijar el acelerómetro en la posición -g. (*lid down* -cara superior hacia abajo) y verificar el voltaje de salida análogo (AOP/ cable verde) con respecto a tierra (cable negro) con el multímetro (Figura 5). Llenar la tabla 2 con los valores encontrados.

Figura 5. Verificación del voltaje AOP - g.

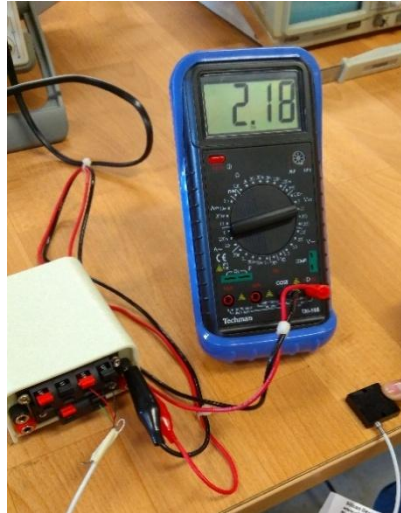


Tabla 2. Medición del voltaje AOP.

	2012-005	2012-010
+g		
-g		

5.1 CÁLCULOS Y RESULTADOS

- Aplicar las fórmulas (1.1) y (1.2) propuestas por el fabricante tomando en cuenta el acelerómetro a caracterizar. Y la fórmula (1.3) aporte de este trabajo de grado.
- Obtener la pendiente Voltaje vs Aceleración y comparar los resultados con los proporcionados en la hoja de datos del fabricante. Anexo hoja de datos.

5.1.1 Análisis del “error de calibración de polarización”. Comparar los datos entregados en la hoja de datos (Tabla 3) con los obtenidos en el experimento (Tabla 4) y verificar si están dentro del rango de las especificaciones de los acelerómetros.

Fórmula de polarización para 0g.

$$[+g. \text{Reading} - (-g. \text{Reading})] \quad (1.1)$$

Tabla 3. Especificaciones Modelo 2012.

ESPECIFICACIONES PARA TODOS LOS MODELOS				
Vs=+5V DC, TC=25°C				
PARAMETROS	MIN	TYP	MAX	UNIDADES
Error de calibración de polarización		0.25	0.9	± % of span

Fuente: *Silicon Designs Inc.*

Tabla 4. Error de polarización.

EXPERIMENTO Vs= __ V DC, TC= __ °C			
PARAMETROS OBTENIDOS	2012-005	2012-010	UNIDADES
Error de calibración de polarización			± % of span

5.1.2 Análisis de sensibilidad

Fórmula de la sensibilidad

- Hallar sensibilidad aplicando la ecuación (1.2).

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\text{Voltaje de salida máximo}}{\# \text{ gravedades}} \text{ [mV]} \quad (1.2)$$

Voltaje de salida máximo de salida= 4V (4000 mV).

gravedades. consultar hoja de datos según el modelo *Available G-Ranges*

¿Qué representa el parámetro sensibilidad para los acelerómetros?

5.1.3 Caracterización de la sensibilidad de los acelerómetros

La ecuación que representa la pendiente Voltaje vs Aceleración tiene la forma clásica de la recta.

$$Y = (m) \times (X) + b$$

$$\text{Vout} = \text{sensibilidad (V)} \times (\#g) + ([+g] - \text{sensibilidad (V)}) \quad (1.3)$$

Sensibilidad: Voltaje de salida máximo / # gravedades.

+g: Voltaje de salida análogo (AOP) en reposo.

#g: Variable de la ecuación (1.3) para completar las columnas Aceleración [G](#g) de las tablas 5 y 6.

Aplicar la ecuación (1.3), llenar las tablas 5 y 6 y realizar la gráfica. El resultado debe ser similar al que proporciona el fabricante visualizado en la figura 6.

**ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS
MANUAL DE OPERACIONES PARA LA PRÁCTICA EN EL LABORATORIO**

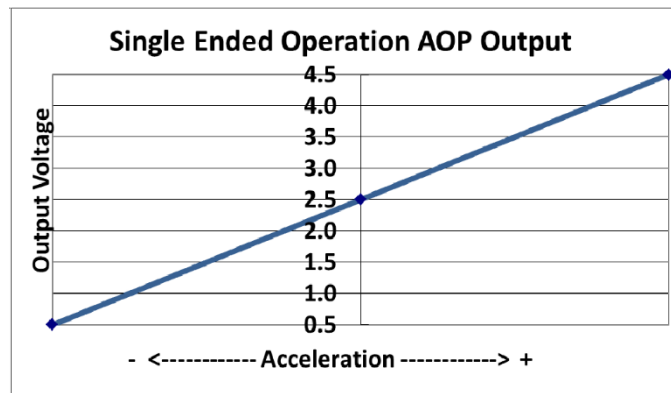
Tabla 5. Caracterización sensor 2012-005.

Aceleración[G](#g)	Vout[V]
-5	
-4	
-3	
-2	
-1	
1	
2	
3	
4	
5	

Tabla 6. Caracterización sensor 2012-010.

Aceleración[G](#g)	Vout[V]
-10	
-9	
-8	
-7	
-6	
-5	
-4	
-3	
-2	
-1	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

Figura 6. Salida AOP en operación simple según fabricante.



Fuente: *Silicon Designs Inc.*

6. Bibliografía

- Circelli, G. (12 de febrero de 2015). Acelerómetros de 3 ejes, lo que necesitas saber. Recuperado el 18 de 12 de 2017, de panamahitek: <http://panamahitek.com/acelerometros-de-3-ejes-lo-que-necesitas-saber/>
- Marta Arenas Mas. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE ACELERACIONES CON PROCESAMIENTO MEDIANTE MICROCONTROLADOR [en línea]. Proyecto fin de carrera. Universidad De Sevilla. Escuela Técnica Superior De Ingenieros. Departamento De Ingeniería Electrónica, Junio 2008. p. 44. [Consultado: 25 de enero de 2018]. Disponible en Internet: Trabajos y proyectos fin de estudios de la E.T.S.I. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11638/fichero/Capitulo+4.pdf>
- Data Sheet SDI 2012 Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/0B4eVto02URUhSEgwanZUVmpYM1E/view>
- Daza G. Nicolás E., Fragozo L. Yulward A. Arreglo de acelerómetros para el estudio básico de la propagación de ondas mecánicas. Bucaramanga, 2018. Trabajo de grado. Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

PRÁCTICA 2: Conexiones y reconocimiento *LabVIEW SignalExpress*.

1. OBJETIVO

- Implementar el software *LabVIEW SignalExpress* para adquirir la información de un acelerómetro.

2. MATERIALES

- Acelerómetros modelo 2012-005, 2012-010

Figura 1. Sensor 2012 Silicon Designs



Fuente: *Silicon Designs Inc.*

- Tarjeta de adquisición de datos NI-9234

Figura 2. NI-9234.



Fuente: *National Instruments Corporation.*

- Software
- PC
- Cables BNC

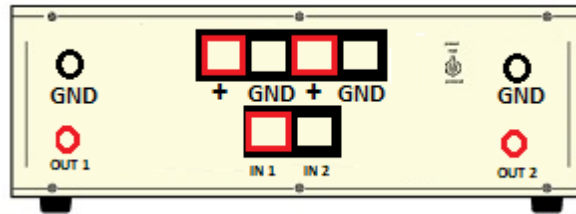
Figura 3. Cables BNC.



Fuente: *National Instruments Corporation.*

- Fuentes de alimentación

Figura 4. Modulo fuente y borneras I/O para los acelerómetros.



- Martillo de goma

Figura 5. Martillo de goma.



Fuente: <http://www.stanleytools.com.co>

3. INTRODUCCIÓN

SignalExpress es un software de *LabVIEW* diseñado para adquirir y visualizar señales de sonidos y vibración para posteriormente analizarlas. Estas se pueden visualizar mediante una tarjeta de adquisición *National Instruments* capaz de transformar señales analógicas a señales digitales.

La práctica integra el trabajo de la tarjeta de adquisición de datos NI-9234, las señales generadas con el martillo de goma, recibidas por los acelerómetros y procesadas con el software *SignalExpress*.

- Del documento: **ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS. 2.3.4**
Adecuación de una herramienta software para la captura de las señales generadas

4. MARCO TEÓRICO

Un sistema **DAQ** consta de sensores, hardware de medidas DAQ y un PC con software programable y mide un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Sirve también para verificar y mejorar el procesamiento de las señales eléctricas del sensor y la calidad general de los datos.

La tarjeta de adquisición de datos NI USB-9234 que se ve en la figura 2. es el módulo de adquisición de señales de cuatro canales utilizados para realizar medidas, las cuales pueden provenir de sensores piezoeléctrico en general.


LabVIEW es un software de programación gráfico que ayuda a visualizar cada aspecto de su aplicación, incluyendo configuración de hardware, datos de medidas y depuración. Esta visualización facilita la integración hardware de medidas de cualquier proveedor, el desarrollo de algoritmos de análisis de datos y el diseño personalizado de interfaz de usuario.

SignalExpress es un programa de medición interactivo que se puede usar para adquirir, analizar y presentar datos de dispositivos e instrumentos de adquisición de datos sin necesidad de programación.¹

5. PROCEDIMIENTO

- En esta práctica se hará uso de un sensor.
- Conectar los terminales del sensor 2012 a la fuente de 5 voltios como se muestra en la figura 6 de acuerdo con el arreglo de cuatro cables que se detalla en la tabla 1.
- Fijar el acelerómetro en la posición + g. (*lid up*-cara superior hacia arriba)

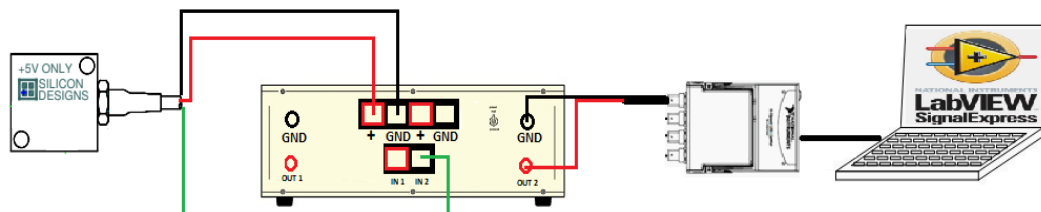
Tabla 1. Convenciones terminales SDI 2012.

+5v: Cable rojo	Arreglo de 4 cables. 
GND: Cable negro	
AOP: cable verde	
AON: cable blanco	

Fuente: *Silicon Designs Inc.*

- Conectar el BNC al canal 0 de la tarjeta de adquisición de datos y las puntas a la fuente *OUT 2* y *GND* como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Esquema de conexión del sistema.

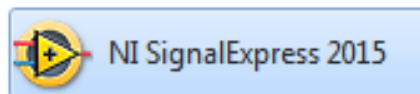


¹ *SignalExpress* Disponible en: <http://www.ni.com/labview/signalexpress/> Citado el 1/02/2018

Teniendo todas las conexiones correspondientes del sensor y de la tarjeta de adquisición, seguir los siguientes pasos:

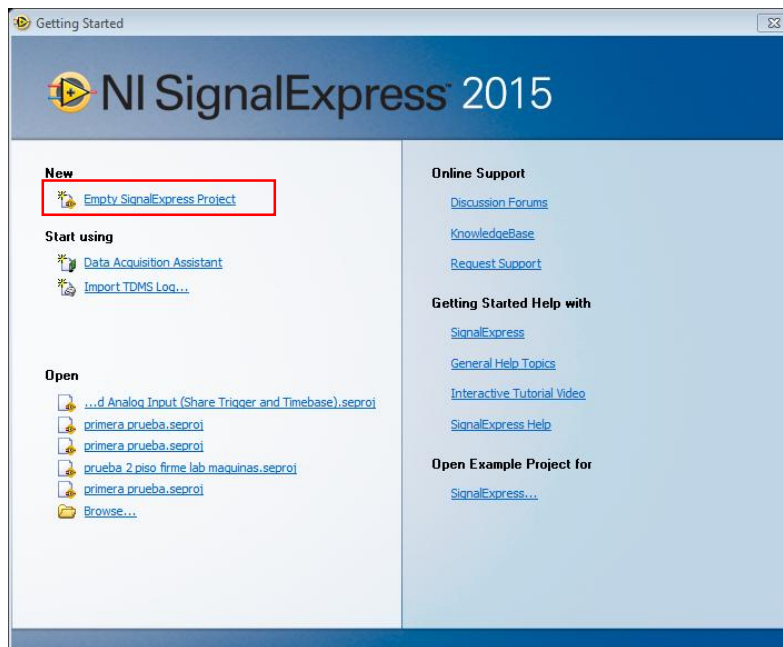
1. Iniciar el programa *NI SignalExpress* cuyo ícono se muestra en la figura 7:

Figura 7. Ícono *SignalExpress*



2. Al abrir la aplicación se despliega una ventana como la siguiente:

Figura 8. Ventana de inicio de *SignalExpress*.

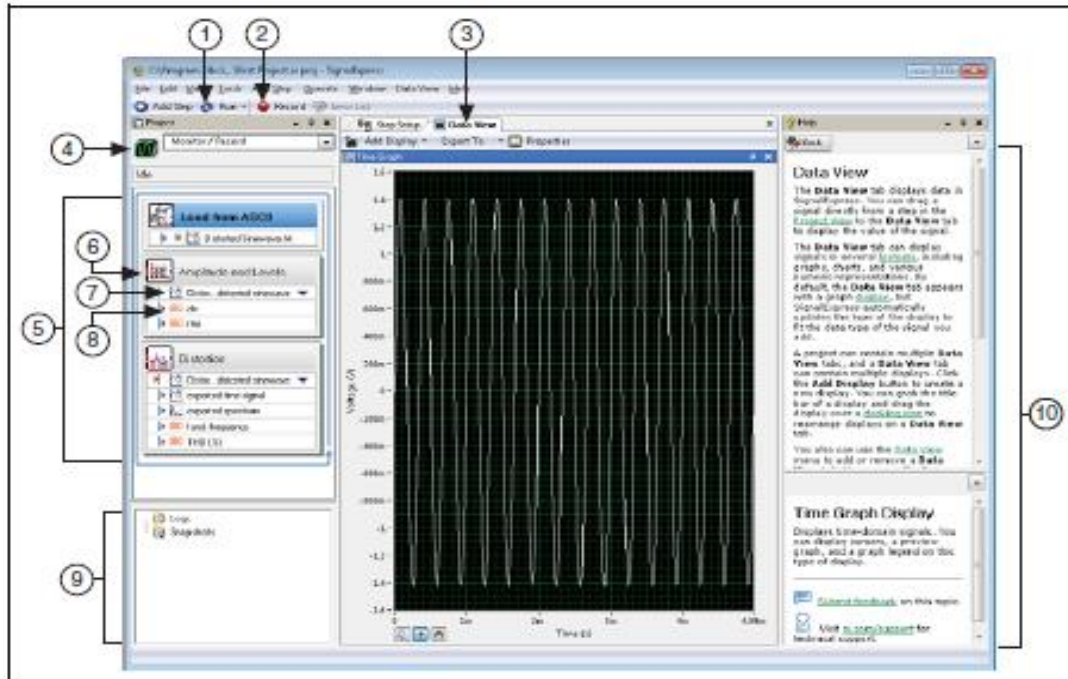


Una vez en la ventana (Figura 8). seleccionar *Empty SignalExpress Project*, para crear un nuevo proyecto.

3. Dentro del programa se visualiza una ventana (Figura 9). que contiene los siguientes elementos.

ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS
MANUAL DE OPERACIONES PARA LA PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

Figura 9. Elementos de la ventana principal de *SignalExpress*



- | | |
|---|---------------------------------|
| 1. Botón Ejecutar | 6. Pasos |
| 2. Botón Grabar | 7. Entrada |
| 3. Vista principal con la pestaña
Vista de datos visible | 8. Salida |
| 4. Menú desplegable del área de
trabajo | 9. Ventana de datos registrados |
| 5. Vista del proyecto | 10. Ayuda contextual |

NOTA: Si al acceder al programa no se abre la configuración por defecto, se selecciona:

»View » Layout » Reset Project to NI Default Layout

Y se regresa al estado original.

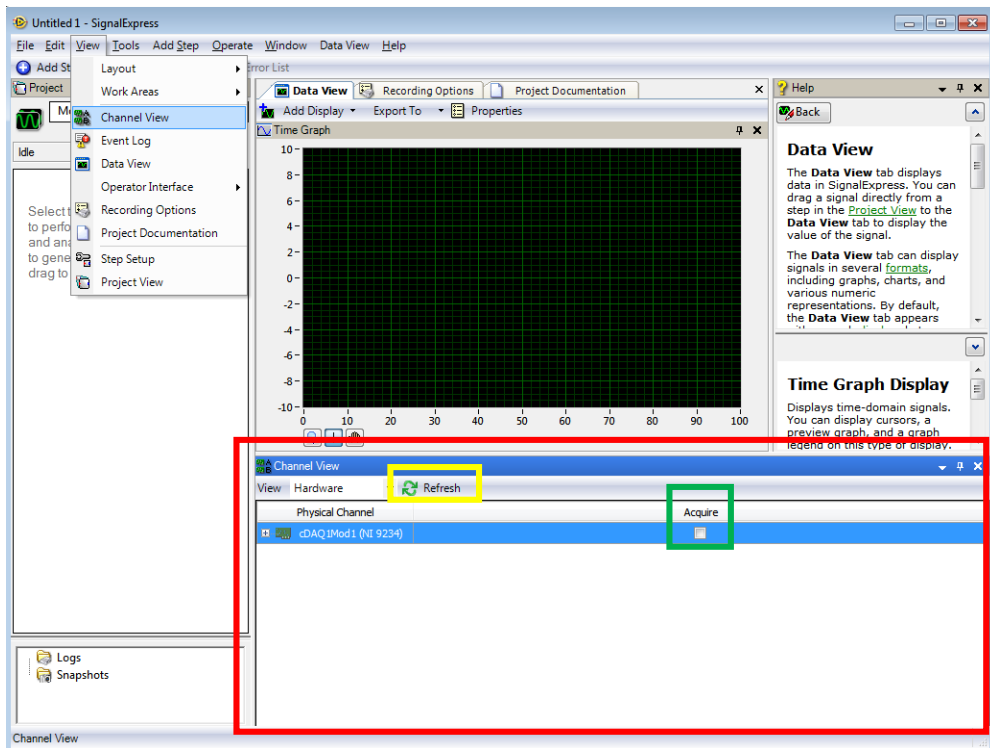
4. Verificar que la tarjeta NI 9234 esté conectada por medio del bus USB al PC. (omitir ventana saliente).

5.

- Hacer clic en la barra de herramientas en la pestaña *View*.
- Seleccionar la opción *Chanel view* que desplegará una nueva ventana donde se visualizan las tarjetas conectadas.
- En caso de no aparecer la tarjeta, hacer clic en *Refresh*.

ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS MANUAL DE OPERACIONES PARA LA PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

Figura 10. Selección de la tarjeta a utilizar.



- Hacer clic en *Acquire* para seleccionar la tarjeta de la que se desea adquirir información (Figura 10).
6. Configurar en la ventana de *Channel View* los parámetros como se visualiza en la figura 11.

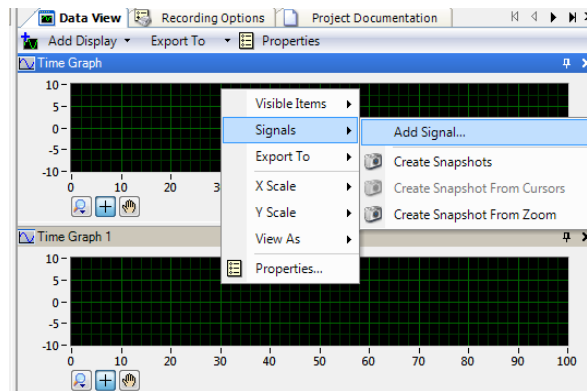
Figura 11. Configuración de los canales a utilizar.

Physical Channel	Acquire	Measurement Type	Max	Min	Scaled Units	Coupling Mode
cDAQ1Mod1 (NI 9234)	<input checked="" type="checkbox"/>	Voltage	5	0	Volts	DC
cDAQ1Mod1/ai0	<input checked="" type="checkbox"/>	Voltage	5	0	Volts	DC
cDAQ1Mod1/ai1	<input checked="" type="checkbox"/>	Voltage	5	0	Volts	DC
cDAQ1Mod1/ai2	<input checked="" type="checkbox"/>	Voltage	5	0	Volts	DC
cDAQ1Mod1/ai3	<input checked="" type="checkbox"/>	Voltage	5	0	Volts	DC

- Seleccionar en *Measurement Type= Voltage Max=5, Min=0*, en *Coupling Mode: DC*, tipo de fuente a usar debido a que se hará una medición de voltaje.
- Cerrar la ventana para tener más espacio de trabajo.

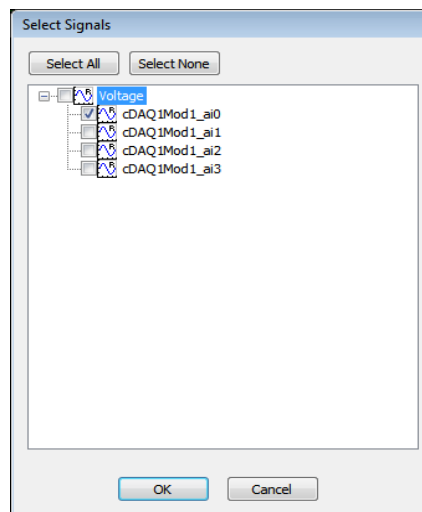
7. El procedimiento para adquirir la señal y visualizar en el *SignalExpress* es el mostrado en la figura 12.

Figura 12. Incorporación de señales.



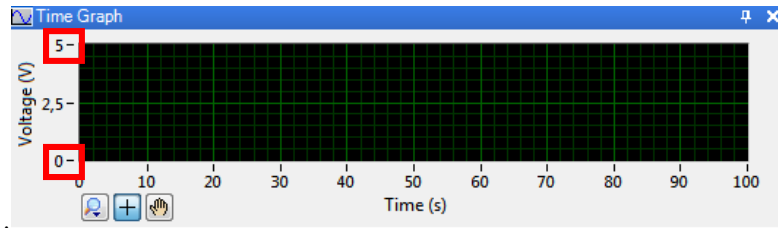
- Hacer clic derecho sobre el *display*» *Clic en signal*» *Add signal*.
- Seleccionar la entrada a visualizar. Para este caso se habilita **cDAQ1Mod1_ai0** como se muestra en la figura 13.

Figura 13. Selección de señales a grabar.



Para visualizar mejor la señal, ajustar entre 0 y 5 V el eje Voltaje dando clic sobre el valor mínimo y máximo como lo muestra en la figura 14.

Figura 14. Ajuste de display



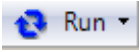
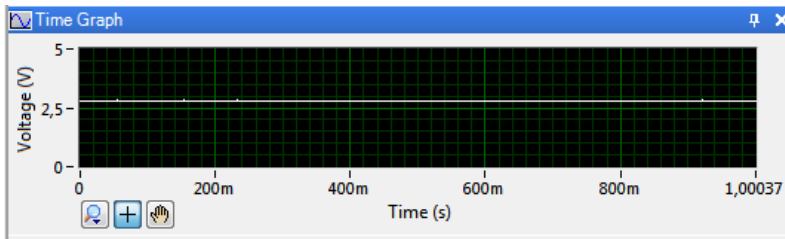
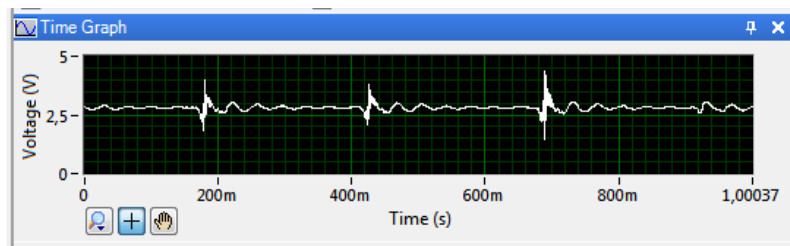
8. Para iniciar la visualización de las señales dar clic sobre el botón  Run.
9. Para verificar el funcionamiento correcto de los sensores se debe visualizar un voltaje constante en 2.5 V (Figura 15).

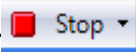
Figura 15. Verificación de funcionamiento.

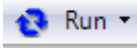


- Al hacer una perturbación en la superficie donde se encuentra el sensor deberán aparecer oscilaciones en la visualización (Figura 16).

Figura 16. Perturbación.

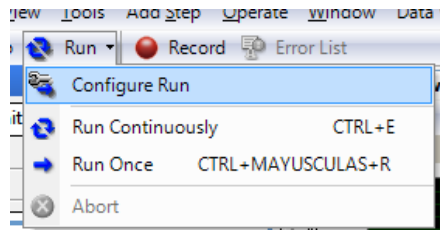


Una vez verificado, pulsar .

10. Para proceder a la toma de señales, grabar un tiempo de 2 segundos. Tiempo suficiente para que el usuario pueda realizar el golpe.
- Dar clic en el símbolo ▼ del botón  Run » *configure run*. (Figura 17).

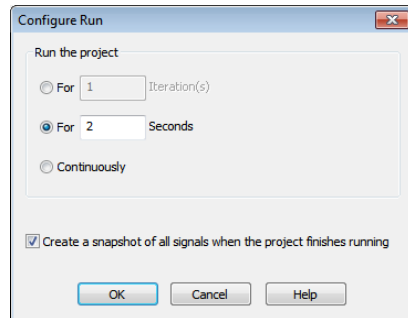
ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS
MANUAL DE OPERACIONES PARA LA PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

Figura 17. Menú Run.



- Configurar la ventana saliente como muestra la figura 18.

Figura 18. Ventana Configure Run.




- Para iniciar la grabación hacer clic en el botón  (Figura 17).
- Se debe seleccionar las señales a guardar y asignar un nombre (Figura 19).

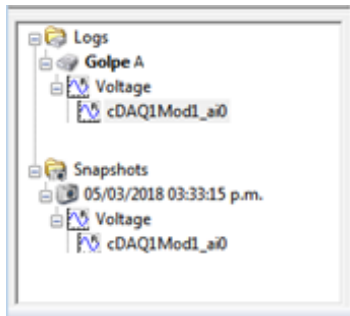
Figura 19. Ventana selección de señales a guardar.



Al hacer clic en **OK** automáticamente inicia la toma de datos, tiempo en el que el estudiante debe hacer la perturbación (**un solo golpe con el martillo de goma**) en la posición indicada para registrarla. Estos datos guardados se observan en la ventana de datos registrados (Figura 20).

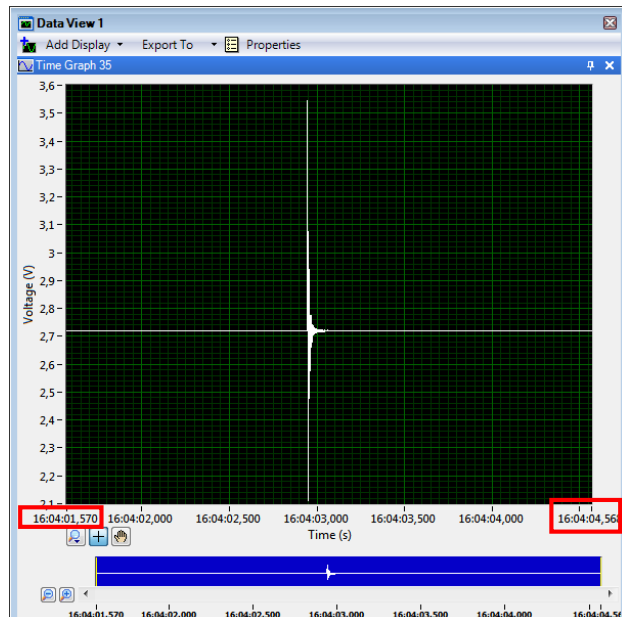
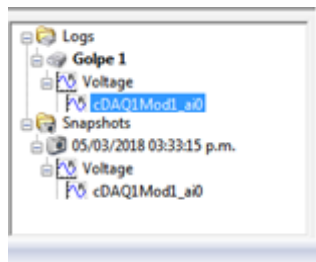
ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS MANUAL DE OPERACIONES PARA LA PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

Figura 20. Ventana de datos registrados.



11. Al hacer doble clic sobre algunas de las señales registradas como se muestra en la figura 21, se puede ver la señal guardada en la figura 22.

Figura 21. Selección de la señal a visualizar. Figura 22. Visualización de $cDAQ1Mod1_ai(0)$.



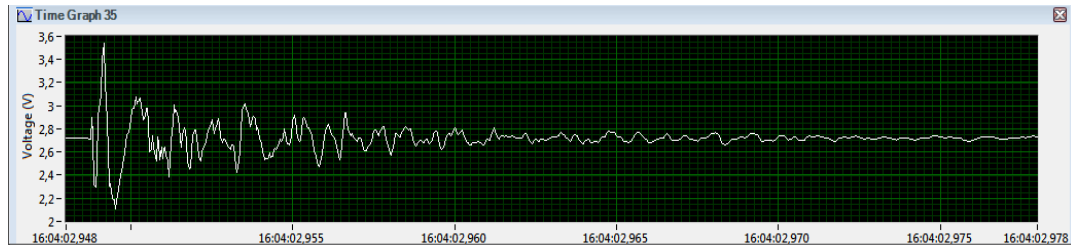
El tiempo que se visualiza en la figura 22 es la hora en la que se hizo la toma.

Ajustar el eje Voltaje y Tiempo para apreciar mejor la señal similar a lo mostrado en la figura 23 y de acuerdo a las siguiente recomendación.

Recomendación:

- Realizado el golpe y grabada la señal, al ajuste para la observación de tiempo se le debe asignar un delta entre 20 y 30 ms en la parte más importante a observar como se muestra en la figura 22.
- La banda azul que se observa en la figura 22 sirve para ajustar el tiempo mediante ensayo y error.

Figura 23. Ajuste de voltaje y tiempo para la visualización de *cDAQ1Mod1_ai()*.



6. Bibliografía

- *SignalExpress* Disponible en:
<http://www.ni.com/labview/signalexpress/> Citado el 1/02/2018.
- Daza G. Nicolás E., Fragozo L. Yulward A. Arreglo de acelerómetros para el estudio básico de la propagación de ondas mecánicas. Bucaramanga, 2018. Trabajo de grado. Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

PRÁCTICA 3: Arreglos básicos para adquisición de ondas.

1. OBJETIVO

- Conectar el acelerómetro, la tarjeta de adquisición de datos y el PC.
- Realizar arreglos básicos para la adquisición de ondas.
- Analizar y encontrar parámetros de las ondas.

2. MATERIALES

- Acelerómetros modelo 2012-005, 2012-010
- Fuentes de alimentación
- Multímetro
- Tarjeta de adquisición de datos NI-9234
- Software
- PC
- Cables BNC
- Martillo de goma

3. INTRODUCCIÓN

La propagación de las ondas se da a través de un medio. Con los arreglos de acelerómetros distribuidos en ese medio se puede visualizar la forma en como viajan las ondas a través del tiempo de propagación. En esta práctica se realizaran algunos arreglos con el objetivo de estudiar y observar la propagación y parámetros de las ondas generadas.

- Del documento: **ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS. 2.3.4**
Adecuación de una herramienta software para la captura de las señales generadas

4. MARCO TEÓRICO

ONDAS MECÁNICAS

La energía de deformación elástica liberada por una fuente sísmica se propaga por el subsuelo mediante ondas las cuales adoptan diversas características, en consecuencia, la onda consiste en la propagación debido a una perturbación física. Según el espacio en el que se propagan existen ondas superficiales y ondas de cuerpo.

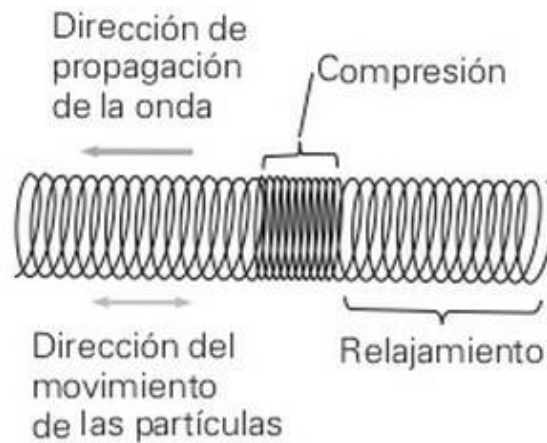
ONDAS P. “Se conocen como ondas primarias, ondas irrotacionales u ondas compresionales debido a las fuerzas de compresión presentes en el medio de propagación”.¹

¹ Wilson, J. D. (1991). Física con aplicaciones. México: McGraw-Hill. 1982

Como ellas presentan siempre mayor velocidad que las ondas S y que las ondas superficiales, son siempre las primeras en llegar a cualquier distancia de la fuente. En materiales isótropos las ondas P se caracterizan porque el movimiento de las partículas del suelo al paso de la onda sigue la misma dirección en que esta se propaga.²

En la figura 1. se puede detallar que en las ondas longitudinales u ondas P la dirección del movimiento de las partículas en el medio es paralela a la dirección de propagación de la onda.

Figura 1 Ondas Ondas Longitudinales



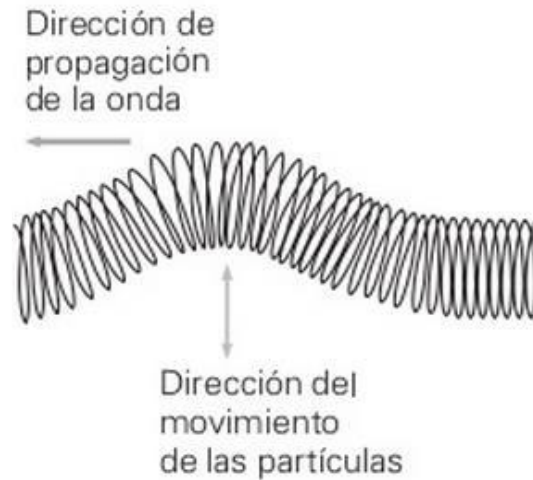
Fuente: Wilson, J. D. (1991). Física con aplicaciones. México: McGraw-Hill. 1982

ONDAS S. “Se conocen como ondas secundarias, ondas de corte u ondas equivoluminales”.¹ Tienen menor velocidad que las ondas P y las partículas del suelo se mueven en una dirección ortogonal a la dirección en que se propaga la onda.

En la figura 2. se puede detallar el movimiento de la partícula del medio perpendicular a la dirección de propagación de la onda para el caso de las ondas transversales u ondas S.

² Universidad central de Venezuela. (s.f.). Guía de prospección sísmica por refracción. Facultad de ingeniería. Escuela de minas y geofísica. Departamento de ingeniería geofísica. Disponible en: <http://www.geocities.ws/geofisicaucv/Archivos/refracc4.pdf> Citado el 29/11/2017

Figura 2. Ondas transversales



Fuente: Wilson, J. D. (1991). Física con aplicaciones. México: McGraw-Hill. 1982

5. PROCEDIMIENTO

Teniendo en cuenta el desarrollo de la **práctica 2: Conexiones y reconocimiento LabVIEW SignalExpress**, realizar las conexiones correspondientes para cada acelerómetro con los siguientes arreglos:

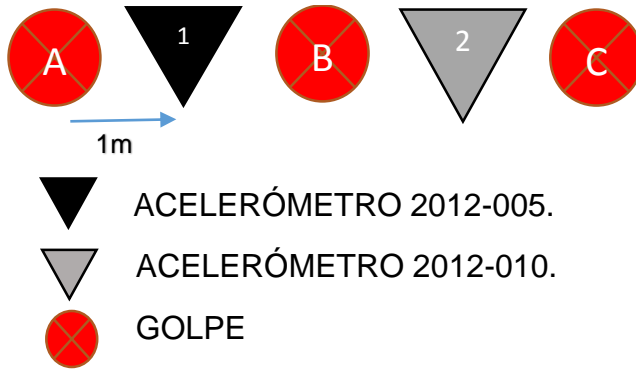
Nota: A diferencia de la practica 2, para las conexiones de los acelerómetros cabe recordar que cada fuente proporciona dos salidas de voltaje, 2 entradas (**IN 1 - IN 2**) y 2 salidas (**OUT 1 - OUT 2**) de señal correspondientes entre sí. En caso de que se necesite conectar mas de 2 acelerómetros utilizar una fuente adicional.

Arreglo 1

En este arreglo se hará uso de 2 acelerómetros lo cual se debe fijar en el suelo como se observa en la topología de la figura 3 y se realizaran 3 golpes.

- La distancia entre golpes y acelerómetros debe ser de 1 metro.
- Para cada uno de los golpes (A, B y C) se hace la respectiva grabación de las señales como se indica en el numeral **5.1 Procedimiento para la captura de señales.**

Figura 3. Arreglo lineal con dos acelerómetros.



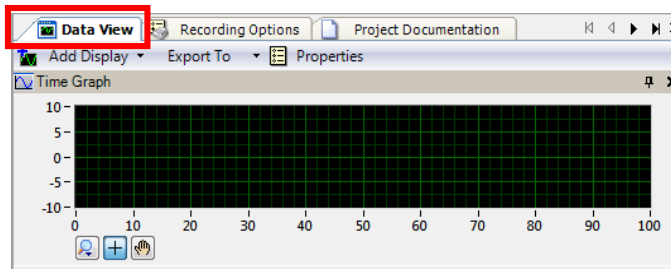
¿Qué puede notar en las dos señales percibidas por los acelerómetros respecto al tiempo?

5.1 Procedimiento para la captura de señales.

Realizar los pasos del 1-6 de la **práctica 2: Conexiones y reconocimiento LabVIEW SignalExpress.**

- 1 En la pestaña *Data View* se debe añadir la cantidad de *displays* necesarios (uno para cada sensor) para la visualización de las señales (Figura 4).

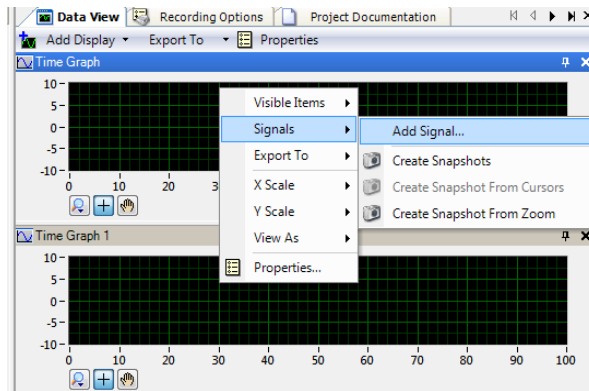
Figura 4. Ventana de visualización de datos.



- 2 Para cada *display* añadir la señal que se quiere visualizar en él, de la siguiente forma:
 - Hacer clic derecho sobre el *display*» *signal*» *add signals* (Figura 5).

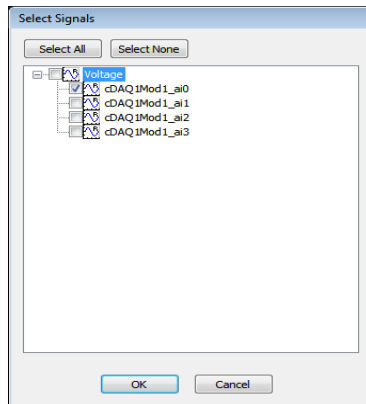
ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS MANUAL DE OPERACIONES PARA LA PRÁCTICA EN EL LABORATORIO

Figura 5. Incorporación de señales.



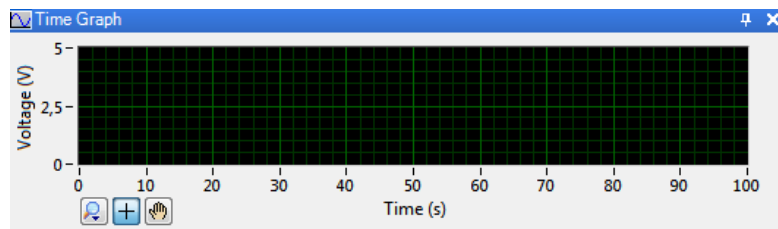
Aparece una nueva ventana en la que se selecciona la entrada a visualizar. (Figura 6).

Figura 6. Selección de entrada.



Para visualizar mejor la señal, ajustar cada *display* entre 0V y 5V, para esto hacer clic sobre el valor mínimo y máximo del eje. (Figura 7)

Figura 7. Ajuste de *display*.




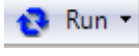
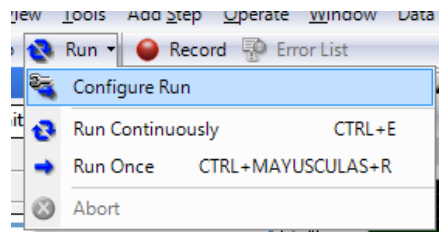
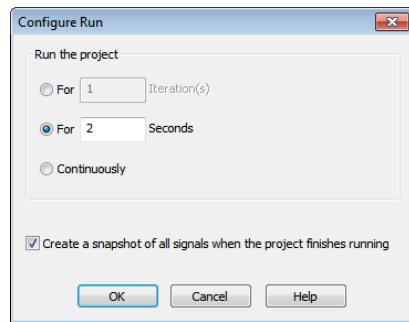
3. Para proceder a la toma de señales, se debe grabar un tiempo de 2 segundos. Tiempo suficiente para que el usuario pueda realizar cada golpe.
 - Dar clic en el símbolo  del botón  » *configure run*. (Figura8).

Figura 8. Menú Run.



- Configurar la ventana **configure run** como se muestra en la figura 9.



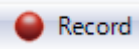
4. Para iniciar la grabación hacer clic en el botón  » seleccionar las señales a guardar» asignar un nombre como se observa en la figura 10.

Figura 10. Ventana selección de señales a guardar.



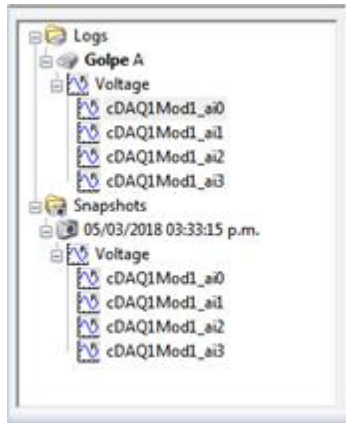
Al hacer clic en **OK** automáticamente inicia la toma de datos. Tiempo en el que el estudiante debe hacer la perturbación (**un solo golpe**) en la posición indicada para registrarla.

Después de configurada la ventana **Run**, al momento de realizar la toma de los siguientes golpes, solo hay que hacer clic en **Record** y seleccionar las señales a guardar como en el paso 4.

Nota: Una toma para cada golpe.

Estos datos guardados se observan en la ventana de datos registrados. (Figura 11).

Figura 11. Ventana de datos registrados.

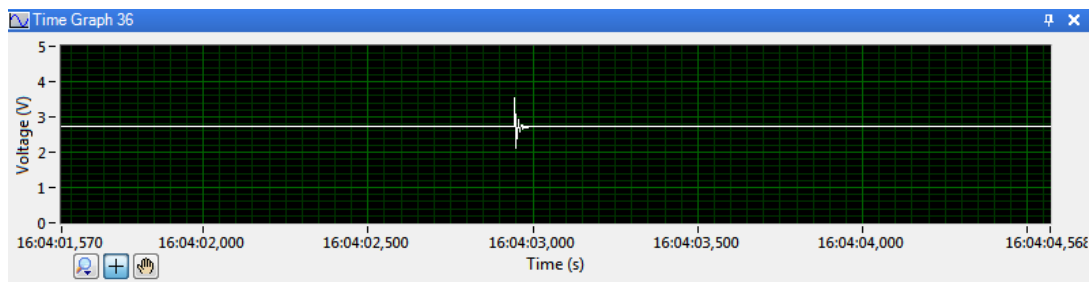


Después de tomar los datos de los acelerómetros para cada golpe; se procede al análisis de la información.

- Para esto cerrar los *displays* que se tienen abiertos y abrir unos nuevos, o en su defecto se pueden mantener los mismos, pero se deben eliminar las señales visualizadas haciendo:
 - clic derecho» *signals*»*remove signals*»selecciona las señales a eliminar.

5. Dirigirse hacia la ventana de datos registrados. Poner el cursor sobre la señal a visualizar y arrastrarla hasta el display (Figura 12).

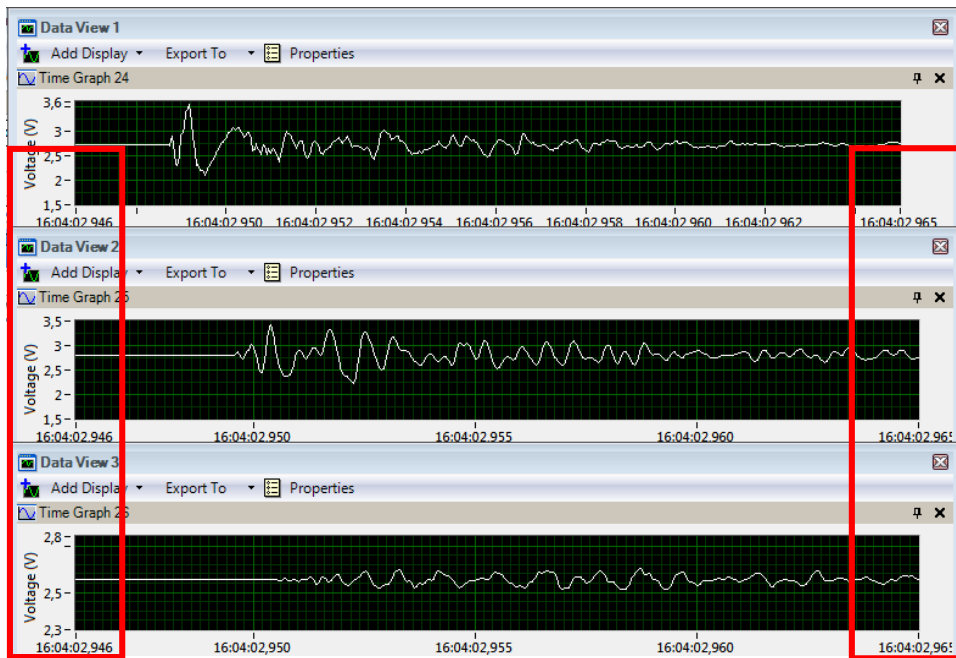
Figura 12. Señal guardada.



6. Ajustar el eje Voltaje y Tiempo para apreciar mejor la señal similar a lo mostrado en la figura 13. Para el delta de tiempo se recomienda tomar un valor entre 20 y 30 ms de acuerdo a como se observe.

Nota: El tiempo de visualización de las graficas debe ser igual.

Figura 13. Ajuste de señales para análisis.

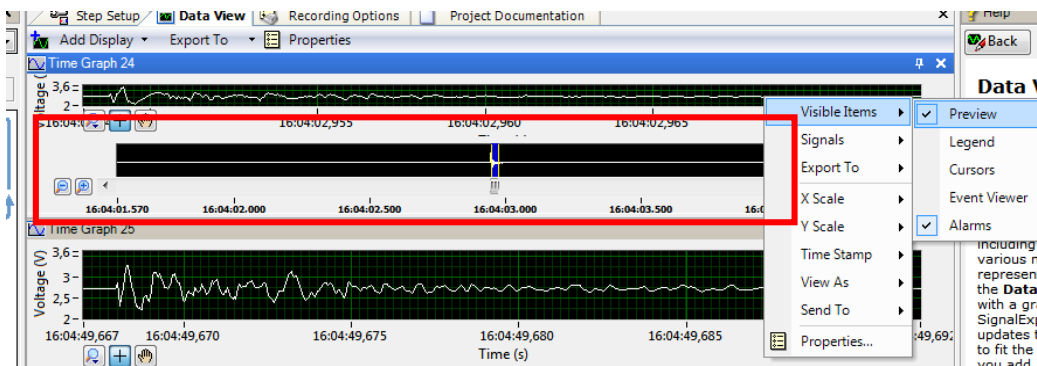


7. Hacer una captura de pantalla y guardar para el informe.

AYUDA: En caso de que aparezca la miniatura del total de la señal y se presenten problemas al realizar la captura para visualizar las señales, se realiza el procedimiento descrito en la figura 14.

- clic derecho sobre el «display» visibles ítems» desmarcar *preview*.

Figura 14. Descripción del procedimiento para eliminar el *preview*.

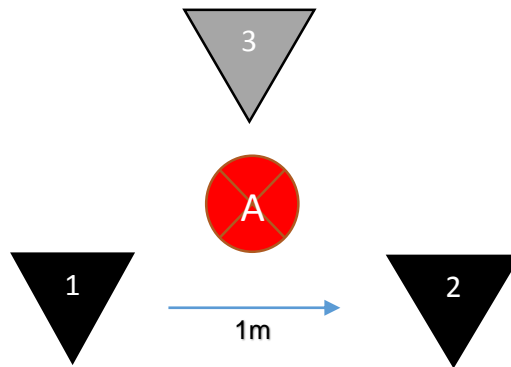


Arreglo 2

En este arreglo se hará uso de 3 acelerómetros los cuales se deben fijar en el suelo como se muestra en la topología de la figura 15.

- La distancia entre acelerómetros debe ser de 1 metro.
- Se realizará un golpe (A) en el centro.

Figura 15. Arreglo triangular.



- ▼ ACELERÓMETRO 2012-005.
- ▼ ACELERÓMETRO 2012-010.
- ⊗ GOLPE

Para la captura de señales repetir **5.1 Procedimiento para la captura de señales.**

¿Qué puede notar en las tres señales percibidas por los acelerómetros respecto al tiempo?

6. BIBLIOGRAFÍA

- Universidad central de Venezuela. (s.f.). Guía de prospección sísmica por refracción. Facultad de ingeniería. Escuela de minas y geofísica. Departamento de ingeniería geofísica. Disponible en: <http://www.geocities.ws/geofisicaucv/Archivos/refracc4.pdf>. Citado el 29/11/2017.
- Wilson, J. D. (1991). Física con aplicaciones. México: McGraw-Hill. 1982.
- *SignalExpress* Disponible en: <http://www.ni.com/labview/signalexpress/> Citado el 1/02/2018.
- Daza G. Nicolás E., Fragozo L. Yulward A. Arreglo de acelerómetros para el estudio básico de la propagación de ondas mecánicas. Bucaramanga, 2018. Trabajo de grado. Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

PRÁCTICA 4: Acercamiento a la exploración sísmica.

1. OBJETIVO:

- Conectar acelerómetro, tarjeta de adquisición de datos y el PC
- Realizar Arreglos lineal para adquisición de ondas
- Analizar y encontrar parámetros de las ondas

2. MATERIALES

- Acelerómetros modelo 2012-005, 2012-010
- Fuentes de alimentación
- Multímetro
- Tarjeta de adquisición de datos NI-9234
- Software
- PC
- Cables BNC

3. INTRODUCCIÓN

La exploración sísmica emplea las ondas elásticas que se propagan a través del terreno y que han sido generadas artificialmente. Su objetivo es el estudio del subsuelo en general, lo cual permite obtener información geológica de los materiales que lo conforman.

- Del documento: **ARREGLO DE ACELERÓMETROS PARA EL ESTUDIO BÁSICO DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS MECÁNICAS**. Consulta 2.3.5
Ensayos para la adquisición y almacenamientos de datos

4. MARCO TEÓRICO

Exploración Sísmica

La exploración sísmica consiste en generar ondas mediante una fuente emisora y registrarlas en una serie de estaciones sensoras (geófonos, acelerómetros) distribuidas sobre el terreno. A partir del estudio de las distintas formas de onda y sus tiempos de trayecto, se consigue obtener imágenes del subsuelo que luego se relacionan con las capas geológicas (secciones sísmicas, campos de velocidades, etc.).

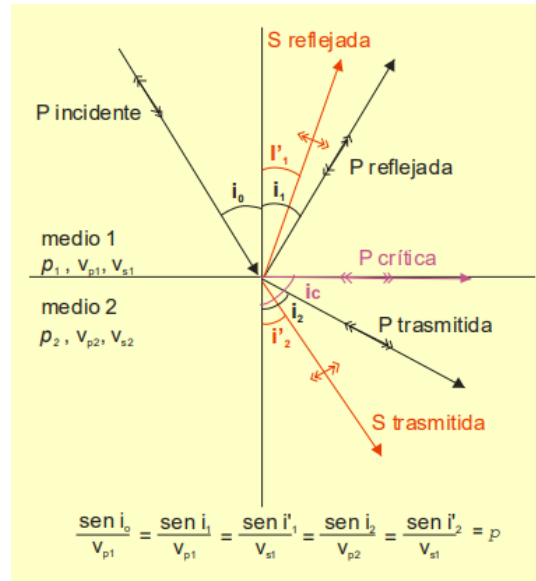
Cuando una onda sísmica encuentra un cambio en las propiedades elásticas del material, como es el caso de una interfaz entre dos capas geológicas; parte de la energía continúa en el mismo medio (onda incidente), parte se refleja (ondas reflejadas) y el resto se transmite al otro medio (ondas refractadas) con cambios en la dirección de propagación, en la velocidad y en el modo de vibración.

Las leyes de la reflexión y la refracción se derivan por el principio de Huygens cuando se considera un frente de onda que incide sobre una interfaz plana.

El resultado final es que ambas leyes se combinan en un único planteamiento: en una interfaz el parámetro de rayo P, debe tener el mismo valor para las ondas

incidentes, reflejadas y refractadas como se muestra en la figura 1. Si el medio consta de un cierto número de capas paralelas, la ley de Snell establece que el parámetro del rayo tiene que ser el mismo para todos los rayos reflejados y refractados resultantes de un rayo inicial dado.¹

Figura 1. Ley de Snell, reflexión y refracción de una onda

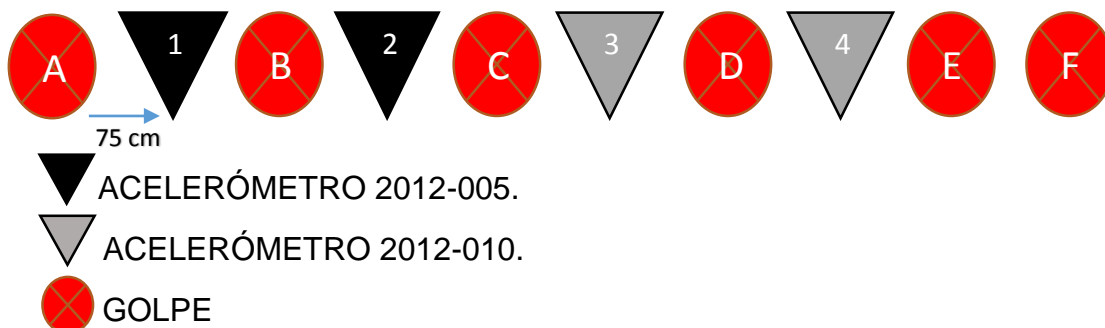


Fuente: Métodos Sísmicos. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3404/7/41205-7.pdf>. Citado el: 30/11/2017

5. PROCEDIMIENTO

En este arreglo se hará uso de 4 acelerómetros que fijaran en el suelo como se muestra en la topología de la figura 2. La distancia entre fuente y sensor debe ser de 75 cm y el golpe se debe realizar en el punto medio entre los sensores.

Figura 2. Arreglo lineal



¹ Métodos Sísmicos. <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3404/7/41205-7.pdf>. Citado el: 05/06/2014

Teniendo en cuenta el desarrollo de las prácticas previas:

- Conectar los acelerómetros, la tarjeta de adquisición de datos y el PC.
- Tomar en cuenta los pasos para la captura de las señales de cada acelerómetro para cada golpe.

¿Qué puede notar en las señales percibidas por los acelerómetros respecto al tiempo?

6. BIBLIOGRAFÍA

- Métodos Sísmicos.
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3404/7/41205-7.pdf>. Citado el: 05/06/2014.
- *SignalExpress* Disponible en: <http://www.ni.com/labview/signalexpress/> Citado el 1/02/2018.
- Daza G. Nicolás E., Fragozo L. Yulward A. Arreglo de acelerómetros para el estudio básico de la propagación de ondas mecánicas. Bucaramanga, 2018. Trabajo de grado. Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.