

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA ENSENADA



PROGRAMA DE POSGRADO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

SISTEMA PORTÁTIL DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL EN SUELO Y ESTRUCTURAS, CON PROCESADO Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS EN SITIO, PARA APLICACIONES SISMOLÓGICAS

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta:

Rogelio Reyes Serrano

Ensenada, Baja California, México, agosto de 2010.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD ENSENADA

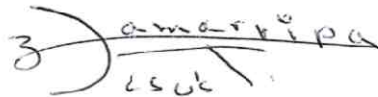
**Sistema portátil de adquisición de datos de vibración
ambiental en suelo y estructuras, con procesado y
visualización de resultados en sitio, para aplicaciones
sismológicas.**

TESIS

Que para obtener el grado de maestría en ingeniería presenta:

Ing. Rogelio Reyes Serrano

Aprobada por:



Dr. José de Jesús Zamarripa Topete
Director de tesis



M.C. Humberto Cervantes de Ávila
Miembro del comité



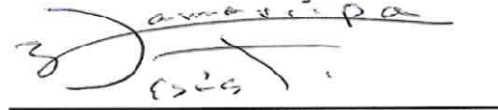
M.C. Luis Humberto Mendoza Garcilazo
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Julio 2010

RESUMEN de la tesis de **Rogelio Reyes Serrano**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada, Baja California, México, agosto de 2010.

SISTEMA PORTÁTIL DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL EN
SUELO Y ESTRUCTURAS, CON PROCESADO Y VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS
EN SITIO, PARA APLICACIONES SISMOLÓGICAS

Resumen aprobado por:



Dr. José de Jesús Zamarripa Topete

Director de Tesis

En este trabajo de tesis, se hace una revisión de las condiciones de los sistemas de adquisición de datos sísmicos del Laboratorio de Instrumentación Sísmica Aplicada a la Ingeniería (LISAI) de CICESE y las necesidades actuales para llevar a cabo el registro de datos sísmicos. Se describe además, el diseño, construcción e integración de un sistema de instrumentación para la adquisición de datos de vibración ambiental en suelos y estructuras, con procesado y visualización de resultados en sitio por medio de un programa desarrollado en Labview. Este sistema adquiere señales en nueve canales de datos, hace el procesamiento aplicando la transformada de Fourier, almacena los datos y presenta en modo gráfico las series de tiempo y sus espectros de Fourier por canal utilizado. El uso final de este sistema es para el apoyo en la adquisición de datos de vibración ambiental en los proyectos de investigación aplicada del LISAI.

Palabras Clave: Sistema de adquisición, vibración ambiental, instrumentación electrónica, Labview.

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mis padres, Herlindo y María Teresa, por darme el Don de la vida, la oportunidad de estudiar, por sus enseñanzas, sus consejos y su gran apoyo en todo momento.

A mi esposa Ruth por su apoyo, que junto a mis hijos Andrea y Rogelio me permitieron robarles un poco de su tiempo para poder llevar a cabo esta nueva meta en mi carrera y culminar con este trabajo. Los amo.

A mis compañeros de generación: Yazmin (Yaz), Miguel (Migue), Luis Rodríguez (Luisito), Luis León (Layon), Aram (Hawuita), Fausto (Hijo mío), Aarón (Olmos) y Kuotaro (Chinito tktin), por su compañerismo, por la unión que tuvimos como grupo, por las buenas traspasadas y sin faltar las buenas comidas que organizamos (no estudiamos pero como comimos).

Y en especial a mi amigo, compadre y finado compañero de trabajo, Ernesto Rocha Guerrero, que siempre compartió la idea de desarrollar este proyecto para facilitar nuestro trabajo. Lo viste nacer y espero que donde quiera que te encuentres veas lo que hemos logrado, nos falta mucho por hacer sólo espero que me sigas apoyando. Gracias por tus enseñanzas que aquí están dando frutos.

Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a:

Al M.C. Luis Humberto Mendoza Garcilazo, por su apoyo para realizar mis estudios de maestría, por su orientación en la realización de este trabajo y por ser parte de mi comité.

Al Dr. José de Jesús Zamarripa Topete por su amistad, enseñanzas, recomendaciones y dedicación como mi director de tesis.

Al M.C. Humberto Cervantes de Ávila, por su amistad, enseñanzas, recomendaciones y por ser parte de mi comité.

Al M.C. José Guadalupe Acosta Chang, por su amistad, su tiempo, recomendaciones y apoyo técnico para realizar este trabajo.

A mis compañeros de generación.

A mis maestros por sus enseñanzas y dedicación.

Contenido

Resumen	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos.....	iii
Contenido	iv
Lista de Figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xiii

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.1.1. Ubicación geográfica del proyecto	1
1.1.2. Antecedentes históricos	1
1.1.3. Estado actual del proyecto.....	3
1.2. Planteamiento del problema	3
1.2.1. Descripción del problema.....	3
1.2.1.1 Registradores.....	4
1.2.1.2.Computadora	5
1.2.1.3.Procesamiento de datos	5
1.3. Pregunta de investigación.....	6
1.4. Hipótesis	6
1.5. Objetivos del proyecto.....	6
1.5.1. Objetivo general del proyecto	6
1.5.2. Objetivos específicos del trabajo	7
1.6. Importancia del estudio.....	7
1.7. Delimitación del estudio	8
1.7.1. Delimitación geográfica	8
1.7.2. Delimitación tecnológica	9

Contenido (continuación)

1.7.3. Delimitación de usuarios.....	10
--------------------------------------	----

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA	11
2.1. Introducción	11
2.2. Vibración ambiental.....	11
2.2.1. Teoría de ondas sísmicas	11
2.2.1.1. Ondas de cuerpo.....	12
2.2.1.2. Ondas superficiales	13
2.2.1.3. Fuentes de las ondas sísmicas superficiales	14
2.2.1.4. Características de los microtemores	15
2.2.2. Método de Nakamura	15
2.2.2.1. Método para estimar el efecto de sitio	17
2.2.3. Estructuras	23
2.2.3.1. Identificación de cambios en la respuesta estructural	23
2.2.3.2. Técnicas de identificación de sistemas estructurales.....	23
2.3. Análisis de Fourier.....	25
2.4. Instrumentación	27
2.4.1. Sensores y transductores.....	27
2.4.2. Registradores comerciales	29
2.4.2.1. Equipos Güralp	29
2.4.2.2. Equipos de Kinematics, Inc.....	30
2.4.2.3. Equipos Ref-Tek.....	31
2.4.3. Equipos académicos	32
2.4.3.1. Tesis de maestría de Arturo Pérez-Vertti Ramírez. Dirigida por M.C. Carlos Gómez Agis. "Sistema digitalizador de 24 bits para registro de señales sismológicas utilizando la tarjeta MSC1210"	32

Contenido (continuación)

2.4.3.2. Tesis de Licenciatura. Guillermo Vargas Hernández. Dirigida por Dr. Fortunato Espinoza Barreras. "Diseño y construcción de un equipo para medición de vibración ambiental"	33
2.5. SUMARIO	35

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA	36
3.1. Introducción	36
3.2. Elementos del sistema.....	36
3.2.1. Módulo de adquisición	37
3.2.2. GPS18 USB	38
3.2.2.1. Formato de lectura GPGGA	39
3.2.3. Sismómetros.....	41
3.2.4. Acelerómetros.....	42
3.2.5. Cableado	43
3.2.6. Módulo de alimentación	46
3.2.7. Computadora	47
3.2.7.1. Capacidad de almacenamiento de datos	47
3.2.8. Sistema operativo	48
3.2.9. Labview	48
3.2.10. Archivo de datos.....	48
3.3. Equipo utilizado	50
3.3.1. Osciloscopio.....	50
3.3.2. Generador de funciones.....	51
3.3.3. Multímetros	52
3.4. Procedimientos	54
3.4.1. Lugar de pruebas	54

Contenido (continuación)

3.4.2. Desarrollo del programa	55
3.4.2.1. Procedimiento 1	55
3.4.2.2. Procedimiento 2	57
3.4.2.3. Procedimiento 3	58
3.4.2.4. Procedimiento 4	62
Prueba de armónicos	62
3.4.2.5. Procedimiento 5	67
3.4.2.6. Procedimiento 6	70
3.4.2.7. Procedimiento 7	79
Filtro RC de primer orden anti-alias.	85
3.4.2.8. Procedimiento 8	86
Filtros pasa bajas tipo Bessel	87
Implementación de los filtros	90
Prueba con un sensor Mark horizontal aplicando excitación ligera	92
Prueba con vibración ambiental en laboratorio	95
Comparación contra SSR-1 en vibración ambiental	98

CAPÍTULO IV

RESULTADOS	110
4.1 Introducción	110
4.2. Resultados en las series de tiempo.....	111
4.3. Resultados de Espectros de Fourier	115

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES	125
5.1 Introducción	125
5.2 Conclusiones	125

Contenido (continuación)

5.3. Trabajos futuros	128
BIBLIOGRAFÍA	129

Lista de Figuras

Figura 1. Diagrama a bloques del proyecto.	8
Figura 2. Movimientos de las ondas P y S.....	12
Figura 3. Movimientos de las ondas superficiales Love y Rayleigh.....	14
Figura 4. Posición de los sensores en el planteamiento de Nakamura.....	18
Figura 5 . Diagrama a bloques de un sistema de adquisición de datos sísmicos. ..	36
Figura 6. Elementos del sistema de adquisición.	37
Figura 7. Módulo de adquisición de datos.....	38
Figura 8. GPS18 con conector USB.	38
Figura 9. Sismómetros de la marca Mark modelo L-4.	41
Figura 10. Sismómetros de la marca Kinemetrics modelos SH-1 y SV-1.....	41
Figura 11. Sismómetros WR-1 en modo de velocidad de Kinemetrics.	41
Figura 12. Acelerómetros WR-1 de la marca Kinemetrics.....	42
Figura 13. Acelerómetros triaxiales FBA-23 de la marca Kinemetrics.	42
Figura 14. Acelerómetros SA-111 de Terra Technology (placa demostrativa).	43
Figura 15. Configuración de los conectores DB9-F del módulo de adquisición.	45
Figura 16. Diagrama general de conexión entre módulo y sensores.	46
Figura 17. Diagrama esquemático del módulo de alimentación por batería.	47
Figura 18. Ejemplo de un archivo de datos.....	49
Figura 19. Osciloscopio portátil de 2 canales.	50
Figura 20. Generador de funciones HP 33120A.	51
Figura 21. Multímetro de mano marca Fluke, modelo 77.	53
Figura 22. Multímetro de banco Fluke.	53
Figura 23. Carátula del programa, se grafica serie de tiempo y espectro de Fourier.	56
Figura 24. Programa: adquisición, procesamiento, grabado de datos, visualización.	56
Figura 25. Carátula con controles de muestras.	57

Lista de Figuras (continuación)

Figura 26. Programa del procedimiento 2 con utilización de controles.	58
Figura 27. Programa del procedimiento 3, se utiliza separación de canales y filtros.	59
Figura 28. Carátula principal, donde se analiza filtro.	61
Figura 29. Carátula para los canales 1, 2, 3.....	62
Figura 30. Comparación de señales con y sin filtro, frecuencia de entrada 120 Hz.	63
Figura 31. Programa donde se incrementa muestreo, se filtra y diezma la señal..	65
Figura 32. Señales sobre muestreadas, filtradas y diezgadas.	66
Figura 33. Prueba de eliminación de frecuencias no deseadas y sus armónicos. ..	67
Figura 34. Programa con la aplicación de filtros de fase cero y diezmo a todos los canales.	69
Figura 35. Interruptores para la selección de canales a utilizar en la medición.....	70
Figura 36. Selección del tipo de sensor por canal.....	71
Figura 37. Carátula con controles de selección de canal y tipo de sensor por canal.	73
Figura 38. Selección de señales adquiridas en función del tiempo.....	74
Figura 39. Carátula de los canales 1, 2, 3, con estadística por canal.	76
Figura 40. Estadísticas por canal.....	77
Figura 41. Programa que incluye tipos de sensor, corrección por instrumento, estadísticas, comparación de canales.	78
Figura 42. Carátula principal con control de ganancia y frecuencias de corte de filtro digital.	80
Figura 43. Controles de ganancia y frecuencia de corte de filtro digital.	81
Figura 44. Vista del menú de ganancias posibles.	82
Figura 45. Programa con ganancia y frecuencias de corte.	84
Figura 46. Canal 1, sin filtros anti-alias y digital, sobre muestreado.	85

Lista de Figuras (continuación)

Figura 47. Canal 2, filtro anti-alias, pero no digital, sobre muestreada.	86
Figura 48. Canal 3, aplicación de filtros anti-alias, digital y diezmado de los datos.	86
Figura 49. Respuesta en magnitud y fase de filtros Bessel vs Butterworth.....	87
Figura 50. Respuestas en amplitud y fase de filtros Bessel.	88
Figura 51. Respuesta en magnitud y fase de filtro Bessel de orden 8, $F_c = 158$ Hz.	89
Figura 52. Diagrama de los filtros Bessel de octavo orden para canales 1, 2, 3....	92
Figura 53. Comparación utilizando filtros y diezmado.	94
Figura 54. Comparación en el dominio de la frecuencia.....	95
Figura 55. Comparación aplicando filtros en vibración ambiental.	96
Figura 56. Comparación de espectros en vibración ambiental.	97
Figura 57. Comparación de espectros en vibración ambiental de 0 a 10 Hz.	97
Figura 58. Comparación de series de tiempo horizontales del SSR-1 vs Módulo. ..	99
Figura 59. Serie de tiempo horizontal graficada en el módulo.	99
Figura 60. Ventana de comparación de las series de tiempo SSR-1 vs Módulo. ..	100
Figura 61. Espectro de Fourier obtenido con el módulo.....	101
Figura 62. Espectro de Fourier de canal horizontal grabado en SSR-1.	101
Figura 63. Comparación de las series de tiempo verticales del SSR-1 vs Módulo.	102
Figura 64. Serie de tiempo vertical graficada en módulo.	102
Figura 65. Ventana de comparación de serie de tiempo vertical.....	103
Figura 66. Espectro de Fourier del canal vertical en el Módulo.....	104
Figura 67. Espectro de Fourier del canal vertical con procesado para SSR-1.	104
Figura 68. Comparación de series de tiempo horizontales del SSR-1 vs Módulo.	105
Figura 69. Serie de tiempo obtenida en el programa del módulo.	105
Figura 70. Espectro de Fourier obtenido con el módulo, eje horizontal.....	106

Lista de Figuras (continuación)

Figura 71. Espectro de Fourier obtenido con el procesado para SSR-1.	106
Figura 72. Comparación de series de tiempo del canal vertical, SSR-1 vs Módulo.	107
Figura 73. Serie de tiempo graficada en el programa del módulo.....	107
Figura 74. Espectro de Fourier del canal vertical con el módulo.	108
Figura 75. Espectros del canal vertical con el procesado para el SSR-1.	108
Figura 76. Diagrama a bloques del programa final.	109
Figura 77. Series de tiempo del canal horizontal obtenidas con SSR-1 y Módulo.	112
Figura 78. Serie de tiempo horizontal, comparación a mayor detalle.	112
Figura 79. Comparación de serie de tiempo con excitación en SSR-1 y módulo..	113
Figura 80. Comparación con excitación y sensor instalado en suelo.	114
Figura 81. Comparación sin excitación con sensor instalado en suelo.....	115
Figura 82. Espectro de Fourier calculado con Labview.....	116
Figura 83. Espectro de Fourier calculado con el paquete de procesado para SSR-1.	116
Figura 84. Espectro de Fourier con excitación calculado con Labview.....	117
Figura 85. Espectro de Fourier con excitación calculado con procesado para SSR-1.	117
Figura 86. Caratula principal, medición de 180 segundos y nueve canales activados.	118
Figura 87. Canales 1, 2, 3, 180 segundos de datos y espectros de Fourier.	120
Figura 88. Canales 1, 2, 3, 600 segundos de datos y espectros de Fourier.	121
Figura 89. Formato del archivo de datos, incluye datos de GPS.	123

Lista de tablas

Tabla 1. Especificaciones técnicas nominales de los sensores a utilizarse.	29
Tabla 2. Características eléctricas y de operación del GPS 18 USB.	39
Tabla 3. Formato GPBGA.	40
Tabla 4. Características eléctricas de acelerómetros utilizados.	43
Tabla 5. Características del generador de funciones HP 33120A.	51
Tabla 6. Características principales de los multímetros Fluke.	54
Tabla 7. Ganancias configuradas.	82
Tabla 8. Características de filtro Bessel de octavo orden y $f_c = 158$ Hz.	90
Tabla 9. Configuraciones a comparar en una misma señal de datos.	93

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La adquisición de datos para aplicaciones sismológicas, se realiza con equipos especializados de alto costo, por lo tanto, renovarlos lleva un tiempo considerable lo que hace que se utilicen hasta el límite de su vida útil u obsolescencia. En este proyecto se plantea diseñar un sistema de adquisición de datos económico y adecuado a las necesidades del usuario, además de sentar las bases de especificaciones para futuros desarrollos.

1.1.1. Ubicación geográfica del proyecto

El proyecto surge en el Laboratorio de Instrumentación Sísmica Aplicada a la Ingeniería (LISAI) del Departamento de Sismología, División de Ciencias de la Tierra de CICESE, por la necesidad de contar con equipos más actualizados tecnológicamente, y renovar los existentes que tienen una antigüedad de 18 años.

1.1.2. Antecedentes históricos

Actualmente se cuenta con varios tipos de registradores para adquisición de datos, así como varios tipos de sensores (sismómetros y acelerómetros). Estos

registradores son de los años 90 con comunicación serie, de 6 canales, limitados en memoria, de dimensiones (Largo 23 cm, Ancho 41 cm, Alto 43 cm) y de 17 Kg de peso. Su operación es de adquisición y grabación de datos en sitio, en formato digital en memoria interna, para después ser transferidos por medio de puerto RS-232 a una computadora. Ya en la computadora, se realiza en el laboratorio el procesamiento de datos y su graficado. El procesamiento se realiza por etapas, con diferentes programas tanto del fabricante como del usuario, de acuerdo a las necesidades del análisis planteado. Para ello, es necesario trabajar en dos sistemas operativos Ms-Dos (adquisición y procesamiento) y Windows (graficado).

Cabe señalar, que actualmente la comunicación por puerto RS-232, en las computadoras portátiles nuevas es difícil de encontrar, ya que este puerto tiende a desaparecer al ser reemplazados por puertos USB. Esto obliga a cuidar al máximo las pocas computadoras portátiles que cuentan con ese puerto de comunicación.

Otro punto importante, es la inconveniencia de trasladar a los sitios de medición, un volumen y peso considerable, entre registradores, maletas con cableado y sensores. El peso varía de 40 a 300 Kg., el cual depende del número de canales a utilizar, tipo de sensores y cantidad de cableado, el peso del equipo hace que su traslado entre estructuras o sitios de medición sea lento.

Por su parte, el no poder validar en sitio las mediciones con un procesamiento preliminar, pudiera algunas veces, representar contratiempos y gastos extraordinarios al tener que repetir las mediciones en campo cuando se obtienen datos erróneos (sensores con fallas, cableado, interferencias).

1.1.3. Estado actual del proyecto

La situación actual de estos registradores es crítica, ya que tienen una antigüedad de 18 años, por lo cual empiezan a tener fallas, teniéndose el inconveniente adicional de que no hay partes de refacción.

Además, tecnológicamente están obsoletos, debido a que utilizan el puerto de comunicación serie para la extracción de los datos y el sistema operativo MS-DOS para el programa de comunicación entre computadora y registrador.

1.2. Planteamiento del problema

Los problemas principales con los equipos disponibles en el laboratorio LISAI, son el tiempo de uso, quedándose obsoletos con las nuevas tecnologías en las computadoras portátiles y en relación a los nuevos equipos disponibles en el mercado, las constantes fallas y en menor medida sus dimensiones.

1.2.1. Descripción del problema

La necesidad de contar con instrumentos de medición con características y tecnologías más actualizadas, compatibles, confiables, ligeros, maniobrables; con procesamiento y validación en sitio de datos, permite hacer el siguiente planteamiento del problema en tres partes:

1.2.1.1 Registradores

Son registradores de más de 18 años de uso, con tres o seis canales por registrador. La comunicación con la computadora es por puerto serie (RS-232) a 9600 o 19200 Bauds, por lo que la transmisión de datos es lenta y su tecnología casi obsoleta en las nuevas generaciones de computadoras.

Sus dimensiones, Largo 23 cm, Ancho 41 cm, Alto 43 cm y sus 17 Kg de peso los hacen difíciles de manipular y transportar.

La capacidad de almacenamiento de datos es de 4 y 8 Mb de memoria, que equivalen aproximadamente a 10 y 20 minutos respectivamente, a una razón de muestreo de 100 muestras por canal en 6 canales. Su capacidad es limitada, lo cual implica bajar los datos cada vez que se llena la memoria para seguir con la adquisición de nuevos datos, lo cual conlleva consumo de tiempo.

La razón de muestreo de estos registradores es de 50, 100 y 200 muestras/segundo por canal al utilizar de uno a seis canales y de 1000 muestras/segundo con un solo canal. La amplificación de la señal de entrada está dada por las ganancias fijas de 1, 10, 100 y 1000. Al igual sus filtros pasa bajas están fijos en 5, 10 y 50 Hz.

La sincronía del tiempo por medio de GPS resultó defectuoso de fabrica, lo que hace que se presenten derivas entre 1 a 10 segundos según la versión del registrador. Son contados los que fueron reparados en su momento.

Las nuevas generaciones de registradores tienen un costo aproximado de \$12,000.00 USD, sin incluir costos de importación y envío. Lo que los hace quedar fuera de presupuesto para reemplazar a los existentes.

1.2.1.2. Computadora

La computadora portátil que se requiere para comunicarse con los registradores, es necesario que cuente con puerto serie (RS-232). Actualmente una sola marca de computadoras y en ciertos modelos, se cuenta todavía con este puerto. Lo que implica que en un futuro de corto plazo ya no se cuente con este puerto, por lo que las computadoras que se tienen deben ser cuidadas al máximo. Además, se requiere que el sistema operativo sea MS-DOS, debido al programa de comunicación que se utiliza con los instrumentos no funciona en ambiente en ventana de DOS de Windows XP.

1.2.1.3. Procesamiento de datos

Otro punto importante del problema es la etapa del procesamiento de datos. Los programas del fabricante y los desarrollados en el LISAI, fueron hechos para trabajar en el sistema operativo MS-DOS. Además de que existe un programa para cada etapa del proceso, y cada uno de estos programas requiere un archivo de datos e instrucciones detalladas. Para obtener gráficas a color y en formatos más accesibles, se grafica por medio de Matlab en el sistema operativo Windows XP, lo que obliga a cambiar de un sistema operativo a otro.

El procesamiento de los datos se realiza en laboratorio con varias técnicas de procesado, y en ocasiones resulta que los datos no son los esperados, por lo cual se tiene que repetir la toma de datos, Lo que implica gastos extraordinarios a los proyectos e inversión de tiempo, ya que las mediciones se realizan generalmente fuera de la ciudad.

1.3. Pregunta de investigación

Para este proyecto la pregunta de investigación es la siguiente:

¿Puede desarrollarse un equipo portátil para uso sismológico, con procesamiento preliminar de datos en sitio incluyendo resultados gráficos?

1.4. Hipótesis

La hipótesis del proyecto es la siguiente:

Sí se puede desarrollar un equipo portátil para uso sismológico con procesamiento de datos y resultados gráficos en sitio.

1.5. Objetivos del proyecto

Los objetivos para lograr este proyecto se plantean primero en un objetivo general y este en objetivos específicos para llevar una secuencia en el desarrollo del mismo.

1.5.1. Objetivo general del proyecto

El objetivo general describe globalmente el proyecto y sus alcances; para el desarrollo y funcionamiento de este proyecto se plantea:

Diseñar y desarrollar un sistema portátil de nueve canales para uso sismológico con procesamiento y resultados gráficos en sitio.

1.5.2. Objetivos específicos del trabajo

Como objetivos específicos para el desarrollo de este proyecto se plantean los siguientes:

- Especificar y diseñar los elementos constituyentes del sistema.
- Integrar el sistema.
- Configurar y programar el sistema.
- Probar y validar el sistema.

1.6. Importancia del estudio

Desarrollo de un sistema de adquisición portátil, de bajo peso y volumen, que permita conocer en sitio la integridad de los datos y algunos parámetros del suelo y estructura en estudio, que sea compatible en conectividad y manejo de voltajes con los tipos de sensores que se utilizan en el Laboratorio LISAI.

Su uso es para la adquisición de datos de vibración ambiental y vibraciones forzadas , para aplicaciones a estudios de suelos y estructuras.

Este sistema permitirá por su portabilidad y características, realizar una mayor cantidad de mediciones y en más sitios por día.

El sistema estará diseñado de acuerdo a las necesidades particulares del laboratorio LISAI, y al permitir el procesamiento en sitio se tendrá mayor certeza de las mediciones, lo que conlleva a un ahorro de tiempo y gastos extraordinarios.

El sistema contará con comunicación USB, será compatible con Windows XP, permitirá el almacenamiento simultáneo a la adquisición, el almacenamiento de datos será confiable y permitirá el análisis grafico en sitio, contando con una capacidad para 9 canales de datos.

El presupuesto para el proyecto es aproximado a \$2,000 USD.

La figura 1 muestra el diagrama a bloques del proyecto.

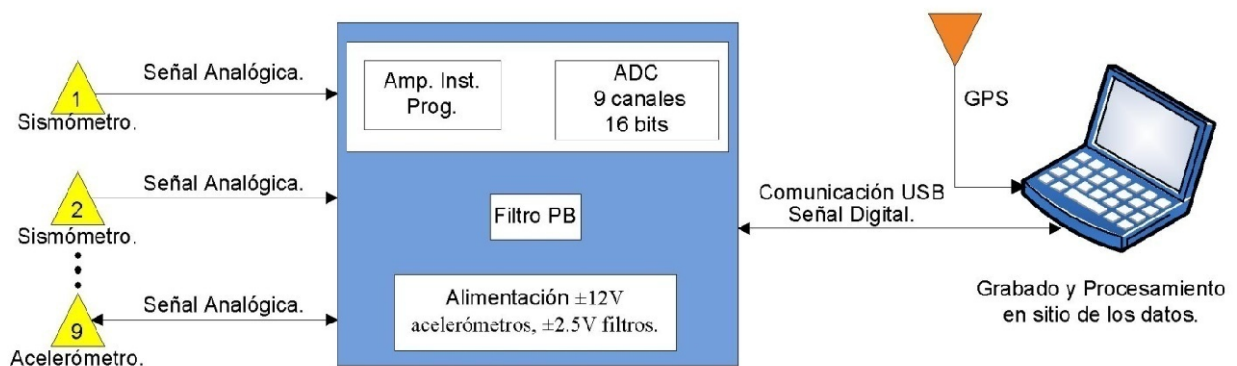


Figura 1. Diagrama a bloques del proyecto.

1.7. Delimitación del estudio

Es importante delimitar el proyecto, tanto en sus alcances, aplicaciones y características para poder llevarlo a término.

1.7.1. Delimitación geográfica

Este sistema tendrá la limitante de operar en sitios secos o de baja humedad, como en interiores o a intemperie en días secos ya que no será a prueba de agua.

1.7.2. Delimitación tecnológica

Será un sistema para adquisición de datos de vibración ambiental en suelo y estructuras con procesamiento en sitio. El sistema tomará muestras de señales analógicas de los sensores a una razón de 50, 100 y 200 muestras/segundo comunes en datos sísmicos. Enviará los datos a la computadora portátil por puerto USB, se realizará el grabado y procesamiento de datos en el programa LabView (última versión al 2008). Sus limitaciones son:

- Por su portabilidad se requerirá una computadora portátil con puertos USB 2.0 o mayor, con sistema Windows XP y con la programación en LabView.
- Nueve canales de datos de 16 bits.
- Tipo de acelerómetros:
 - Por la configuración de los voltajes de alimentación sólo se podrán utilizar acelerómetros con polaridad $\pm 12V$ o con regulador externo en acelerómetro con entrada de $\pm 12V$. Así como el estándar en cableado del laboratorio LISAI.
 - Los acelerómetros utilizados serán de la marca Kinometrics modelos: WR-1, FBA-23, Epi Sensor.
- Tipo de sismómetro y cableado:
 - Se utilizarán sismómetros de las marcas Mark modelos: L4-C, Kinometrics modelos: SH-1, SV-1 y WR-1 en velocidad.
 - La configuración del cable del sismómetro debe cumplir con el estándar del laboratorio LISAI de CICESE.
- Formatos de archivos:

Los archivos se generarán en sistema binario o ASCII en formato CICESE.
- Tipos de programas:

El programa se realizará en LabView, versión 8.6, donde se recibirán los datos, grabarán y procesarán, bajo la plataforma de Windows XP.

1.7.3. Delimitación de usuarios

El sistema se utilizará única y exclusivamente en los proyectos del laboratorio LISAI en CICESE en aplicaciones sismológicas.

El sistema será uniusuario y no será una aplicación de red.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Introducción

En este capítulo se revisará y analizará la literatura relacionada con el desarrollo del proyecto, además de trabajos y equipos desarrollados comercial y académicamente.

2.2. Vibración ambiental

La vibración ambiental es un conjunto de movimientos inducidos por diferentes fuentes como el ruido urbano, oleaje y mareas oceánicas así como cambios en presiones atmosféricas a nivel global. También se le conocen a este tipo de movimientos como microtemores.

2.2.1. Teoría de ondas sísmicas

Son vibraciones que viajan a través de la Tierra, se originan por liberación de energía elástica al fracturarse los materiales rocosos en la corteza terrestre. Estas ondas se pueden dividir en dos tipos: ondas de cuerpo y en ondas superficiales.

2.2.1.1. Ondas de cuerpo

Las ondas de cuerpo viajan a través del interior de la Tierra, estas siguen caminos curvos, debido a la composición y densidad de los materiales del interior de la Tierra. Estas ondas se clasifican en: ondas Primarias (P) y Secundarias (S).

Las ondas P o compresionales se propagan a través de medios sólidos o líquidos. Se desplazan longitudinalmente, comprimen y dilatan los materiales. Viajan a una velocidad aproximada de 8 Km/s. [1]

Las ondas S u ondas de cizalla, son ondas transversales o de corte: los materiales son desplazados perpendicularmente a la dirección de propagación, alternadamente de un lado hacia el otro. Pueden viajar solamente a través de sólidos debido a que los líquidos no soportan esfuerzos de corte. Su velocidad de propagación es un aproximado del 58% de la velocidad de las ondas P. En la figura 2 se ilustran los movimientos de las ondas P y S. [2]

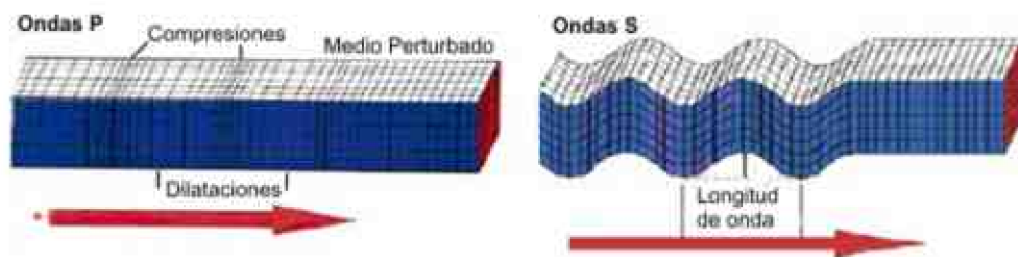


Figura 2. Movimientos de las ondas P y S.

2.2.1.2. Ondas superficiales

Estas ondas viajan por la superficie de la Tierra, desplazándose a menor velocidad que las ondas de cuerpo. En algunos ambientes sedimentarios, por su baja frecuencia son las que entran con mayor facilidad en resonancia con las estructuras, por consiguiente son más destructivas. Existen dos tipos de ondas superficiales: Ondas Rayleigh y Ondas Love.

Las Ondas Love son las de mayor velocidad. Presentan movimiento horizontal de cizalla, normal a la dirección de propagación.

Las Ondas Rayleigh son de amplitud decreciente y tiene tres características principales:

- Se transmiten por la superficie, afectan un rango de profundidad proporcional a su longitud de onda.
- Su velocidad de propagación, definida como velocidad de fase C_R , es determinada por la velocidad de los materiales V_S . La ecuación 1 la define como:

$$C_R = 0.94 V_S \quad (1)$$

Donde:

$C_R =$ Velocidad de fase (Km/s).

$V_S =$ Velocidad de cizalle de los materiales (Km/s).

- Su amplitud vertical disminuye con la profundidad. El movimiento de la partícula asociada a ellas es de tipo elipsoidal, su eje mayor en la vertical y en el sentido de propagación.

En la figura 3 se ilustra el movimiento de las ondas superficiales Love y Rayleigh.
[2]

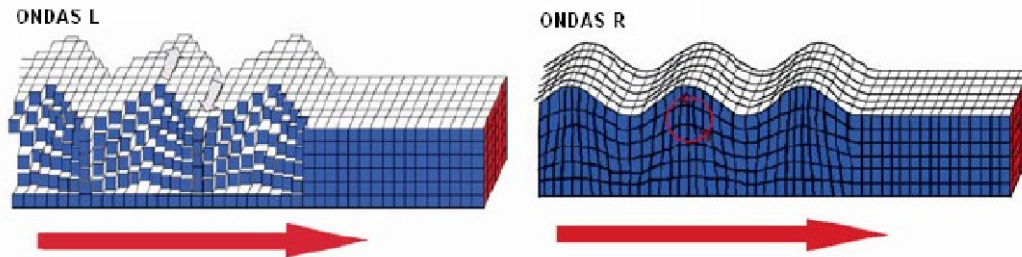


Figura 3. Movimientos de las ondas superficiales Love y Rayleigh.

2.2.1.3. Fuentes de las ondas sísmicas superficiales

Estas ondas sísmicas provienen de fuentes diferentes, que pueden clasificarse por su origen.

- Fuentes Internas:
 - Falla sísmicas.
 - Explosiones subterráneas.
 - Flujo hidrológico.
- Fuentes Externas:
 - Vientos.
 - Oleaje y mareas.
 - Explosiones superficiales.
 - Ruido civil.
- Fuentes Mixtas:
 - Erupciones volcánicas.
 - Deslizamientos.
 - Avalanchas

También la clasificación se puede hacer por su origen en natural o artificial. Como fuentes naturales están: el oleaje, el viento, presión atmosférica, actividad volcánica y las fallas sísmicas entre otras, como fuentes artificiales: Tráfico vehicular y peatonal, maquinaria industrial, explosiones entre otras. [2]

2.2.1.4. Características de los microtemores

El intervalo de frecuencias de los microtemores es de 0.01 a 30 Hz., en la exploración sismológica aplicada a ingeniería comúnmente el intervalo de 0.1 a 10 Hz. es el que interesa, debido a que parte de la energía se transmite como ondas Rayleigh en este intervalo. Si se mide con arreglos instrumentales los modos y velocidades de propagación se puede obtener información sobre las características de las propiedades elásticas de la corteza terrestre hasta profundidades de 20 Kms.

2.2.2. Método de Nakamura

El método de Nakamura utiliza datos de vibración ambiental para obtener el periodo dominante del suelo en el sitio de medición. Y se aplica este método por ser rápido y económico en comparación a otras técnicas.

Representación del movimiento del suelo por medio del método de Nakamura.

El movimiento del suelo inducido por ondas sísmicas se caracteriza por los factores de fuente, trayectoria y sitio. Donde la trayectoria, es la ruta que siguen las ondas sísmicas desde el punto donde ocurre el sismo (fuente) hasta el punto

de medición (sitio), el sitio es la ubicación geográfica del suelo o estructura donde se hace la medición. La trayectoria depende de características geométricas y dinámicas de la fuente sísmica; su efecto depende de las características físicas del medio terrestre en que se propagan las ondas sísmicas. Y el efecto inducido por el sitio se relaciona con las características físicas y geométricas de los materiales cercanos al sitio de medición.

Se puede representar un registro sísmico sobre la superficie de la tierra, en donde se encuentra la estación i , $a(t)$, como la convolución de todas las funciones que lo generan como son: fuente $f(t)$, trayectoria $t(t)$, sitio $s(t)$ y el instrumento de medición $i(t)$. El analizar en el dominio de la frecuencia el registro sísmico o sismograma $a(t)$, al realizar el proceso matemático se multiplican los escalares de las transformadas de Fourier (T. de F.) de las funciones que lo conforman, como se muestra en (2).

$$Aix(f) = Fix(f) \cdot Tix(f) \cdot Si(f) \cdot Ii(f) \quad (2)$$

Donde:

$Aix(f)$ = T. de F. del sismograma del terremoto x , registrado en la estación i .

$Fix(f)$ = T. de F. de los efectos de fuente del terremoto x , y patrón de radiación en la dirección de la estación i .

$Tix(f)$ = T. de F. de los efectos de la trayectoria entre la fuente del terremoto x , y la estación i .

$Si(f)$ = T. de F. de los efectos de sitio en la estación i .

$Ii(f)$ = T. de F. de la respuesta instrumental en la estación i .

- = Producto entre escalares.

Los efectos del instrumento de medición en el sismograma, es corregida de dos maneras: al hacer el procesamiento digital de los datos o al hacer el cociente espectral se eliminan si los parámetros instrumentales son los mismos. [3]

2.2.2.1. Método para estimar el efecto de sitio

Existen diferentes técnicas para estimar el efecto de sitio que enfatizan sus diversos efectos. En el procesamiento de datos de la superficie se eliminan los efectos de la fuente, la trayectoria y el aislamiento de los efectos inducidos por la litología somera alrededor del sitio de medición.

Uno de estos efectos es el periodo dominante del movimiento del suelo, el cual se puede estimar a partir de datos empíricos. Estos datos pueden ser de vibración ambiental que puede ser una combinación de microsismicidad y microtemores.

Entre las técnicas más comunes para la estimación del efecto de sitio a partir de vibración ambiental están: a) interpretación directa de las amplitudes de los espectros de Fourier,[4]; b) cálculo de razones espectrales relativas a un sitio de referencia, [5], [6]; y c) cálculo de razones espectrales de las componentes horizontal y vertical del movimiento del suelo, con la técnica de Nakamura, [7].

La técnica de Nakamura se basa en considerar espectros en la superficie y en la base de la capa sedimentaria, se utilizan cuatro espectros: dos en la superficie, uno horizontal (HS) y otro vertical (VS); los otros dos en la base, horizontal (HB) y vertical (VB). Los espectros de la base se consideran en el análisis de la técnica pero no son necesarios en la práctica como se analizará a continuación. La figura 4 muestra el planteamiento de Nakamura.

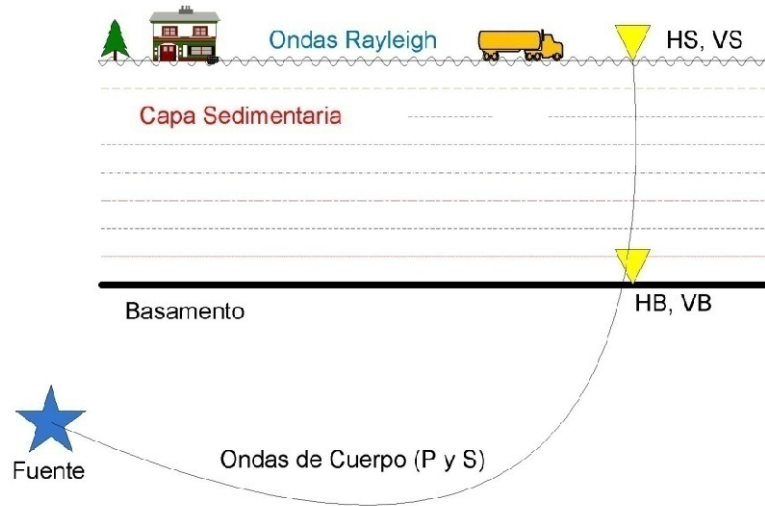


Figura 4. Posición de los sensores en el planteamiento de Nakamura.

Una medición de vibración ambiental de la componente horizontal (HS), realizada en la superficie de la capa sedimentaria, contiene los efectos de microsismicidad (globales) que se propagan como ondas de cuerpo (P y S) y efectos de microtemores (locales) que se propagan como ondas Rayleigh. Donde el Espectro de Fourier (E. de F.) de la componente HS en la superficie está dado por la relación:

$$HS(f) = FH(f) \cdot FR(f) \cdot S(f) \quad (3)$$

Donde:

$HS(f)$ = E. de F. de la componente horizontal en superficie.

$FH(f)$ = E. de F. de las ondas de cuerpo polarizadas horizontalmente.

$FR(f)$ = E. de F. de las ondas Rayleigh.

$S(f)$ = E. de F. del efecto de sitio.

Por otro lado, el espectro de Fourier de la componente horizontal de un registro de vibración ambiental en la base de la capa sedimentaria, no contiene el efecto de las ondas superficiales Rayleigh, ni el efecto de la capa sedimentaria, sólo contiene

el efecto de las ondas de cuerpo. Esto es debido a que se encuentra en la base de la capa sedimentaria, como se muestra en la figura 4. Su ecuación sería:

$$HB(f) = FH(f) \quad (4)$$

Donde:

$HB(f)$ = E. de F. de la componente horizontal en base de la capa sedimentaria.

$FH(f)$ = E. de F. de las ondas de cuerpo polarizadas horizontalmente.

De las ecuaciones (3) y (4) se puede tener un aproximado del efecto de sitio, se elimina el efecto por fuentes lejanas al dividir los registros de microtemores como se muestra en la ecuación (5):

$$C_1(f) = \frac{HS(f)}{HB(f)} = \frac{FH(f) \cdot FR(f) \cdot S(f)}{FH(f)} = FR(f) \cdot S(f) \quad (5)$$

Donde:

$C_1(f)$ = Efecto de sitio de la capa sedimentaria, sin los efectos de fuentes de ondas de cuerpo.

Para las componentes verticales, Nakamura supone que los datos de vibración ambiental no contienen los efectos producidos por la capa sedimentaria, basándose en el análisis siguiente: se considera que la componente horizontal de un registro de datos de vibración ambiental es amplificada por la capa sedimentaria mediante reflexiones múltiples de ondas de cuerpo S, y la componente vertical es amplificada por las reflexiones múltiples en la capa sedimentaria por las ondas de cuerpo P. Sí se utiliza la fórmula (6) propuesta por Aki [3] donde relaciona el espesor de la capa sedimentaria con la longitud de onda multireflejada y la velocidad de propagación. Se pueden conocer los espesores de las capas sedimentarias que pueden ser observadas por las ondas de cuerpo de microtemores que se propagan verticalmente.

$$E = \frac{\beta T}{4} \quad (6)$$

Donde:

E = Espesor de la capa sedimentaria (metros).

β = Velocidad de propagación de la onda multireflejada (metros/segundo).

T = Periodo dominante del movimiento del suelo (segundos).

Se considera que los periodos de interés del movimiento del suelo para la ingeniería están entre 0.1 y 5 segundos, y que las velocidades de las ondas P son generalmente mayores a 1000 m/s. Se tiene por medio de (6) que el espesor de la capa sedimentaria que pudiera afectar el movimiento vertical varía entre los 250 y 1250 metros. Y como los efectos de sitio son producidos sobre las ondas en los últimos 30 metros antes de llegar a la superficie, se puede considerar que el efecto de sitio $S(f)$, no afecta la componente vertical de los datos de vibración ambiental. De acuerdo a la literatura esta conclusión ha sido verificada experimentalmente, entre otros por Acosta [8].

Por lo tanto, los espectros de Fourier de las componentes verticales están dados por las relaciones:

$$VB(f) = FV(f) \quad (7)$$

$$VS(f) = FV(f) \cdot FR(f) \quad (8)$$

Donde:

$VS(f)$ = E. de F. de la componente vertical en la superficie.

$VB(f)$ = E. de F. de la vertical en el basamento.

$FR(f)$ = E. de F. de las ondas Rayleigh.

$FV(f)$ = E. de F. de las ondas de cuerpo polarizadas verticalmente.

Se parte que del cociente de las componentes verticales, cuyos datos no contienen el efecto de la capa sedimentaria, se puede aislar el efecto de sitio $S(f)$ al corregir los efectos de fuentes locales $FR(f)$.

$$FR(f) = \frac{VS(f)}{VB(f)} \quad (9)$$

Se sustituye (7) y (8) en (9) se tiene:

$$FR(f) = \frac{FV(f) \cdot FR(f)}{FV(f)} \quad (10)$$

En la ecuación (10) se observa que se aísla el efecto de las fuentes locales, al realizar el cociente. Ahora se divide (5) con (9), se aplica la corrección por fuente local y se obtiene la función de transferencia de la capa sedimentaria $S(f)$:

$$C(f) = \frac{C_1(f)}{FR(f)} = \frac{FR(f) \cdot S(f)}{FR(f)} = S(f) \quad (11)$$

Donde:

$C(f)$ = Efecto de sitio de la capa sedimentaria.

Se sustituye (5) y (9) en (11) en términos de los componentes espectrales se tiene:

$$C(f) = \frac{\frac{HS(f)}{HB(f)}}{\frac{VS(f)}{VB(f)}} = \frac{HS(f) \cdot VB(f)}{HB(f) \cdot VS(f)} \quad (12)$$

Se aplican las expresiones (4) y (7) en (13) se obtiene:

$$C(f) = \frac{HS(f) \cdot FV(f)}{FH(f) \cdot VS(f)} \quad (13)$$

Se considera que los espectros de las componentes $FH(f)$ y $FV(f)$ son aproximadamente iguales, debido a que las ondas de cuerpo provienen de fuentes lejanas y se espera que estas ondas viajen en todas direcciones, por lo que tienden a hacerse homogéneas en una escala global. Por lo que las polarizaciones vertical y horizontal del ruido sísmico ambiental en el basamento serían indistinguibles. Es decir $FH(f) \cong FV(f)$. Nakamura comprobó experimentalmente lo anterior al tomar datos en el basamento.

Por lo que (13) se puede expresar como:

$$C(f) = \frac{HS(f)}{VS(f)} \quad (14)$$

Donde (14) es el efecto de sitio estimado por el cociente de las componentes horizontal y vertical del movimiento en superficie.

Esta técnica de Nakamura, ha sido aplicada satisfactoriamente alrededor del mundo. Y es aplicada en el laboratorio LISAI y otros del departamento de sismología en CICESE.

Si se aplica la técnica de Nakamura a registros de vibración ambiental se pueden estimar de una forma económica y rápida los efectos de sitio, como es el periodo dominante del suelo. Por las pruebas al momento realizadas, sólo es aplicable a mediciones en suelos y no en estructuras.

2.2.3. Estructuras

Con la toma de datos de vibración ambiental en estructuras se busca identificar parámetros que controlan la respuesta sísmica en estructuras y sus posibles cambios ante un evento sísmico.

2.2.3.1. Identificación de cambios en la respuesta estructural

Los eventos sísmicos pueden dañar obras civiles, tanto en cantidad como en severidad. Estos daños pueden ser provocados por un acoplamiento entre las frecuencias características de la estructura y la frecuencia fundamental del sitio donde se encuentra construida. La estructura amplifica las frecuencias comunes con el suelo debido al efecto de resonancia.

2.2.3.2. Técnicas de identificación de sistemas estructurales

Se han desarrollado técnicas que permiten estimar con cierto grado de confiabilidad los parámetros dinámicos que intervienen en la respuesta sísmica de un sistema estructural. Como son las frecuencias características, formas modales y amortiguamiento. Una de estas técnicas es a partir de vibraciones ambientales.

La respuesta estructural puede estudiarse si se excita la estructura, y se miden las respuestas a estas excitaciones. Hay varios métodos para lograrlo. Un método consiste en utilizar un vibrador mecánico, el cual genera amplitudes y frecuencias que pueden variarse; al hacer un barrido en frecuencia se encuentran las frecuencias resonantes de la estructura. Otro método, es el utilizar un tensor que al liberarlo permite que oscile libremente la estructura. Un método más económico

es el de vibración ambiental, donde sus fuentes de excitación son la actividad humana, las perturbaciones atmosféricas, así como la sismicidad local y regional.

Para medir estas excitaciones se utilizan sensores de movimiento y sistemas de adquisición de datos. Se procesan los datos, se emplea la transformada de Fourier, y se puede identificar entre otras: las frecuencias características de la estructura, sus primeras formas modales, torsión y amortiguamiento.

Al medir regularmente las características dinámicas de una estructura, se puede estudiar el comportamiento y evolución de la misma ante eventos sísmicos. Un cambio en estas características podría indicar algún cambio físico en los parámetros del suelo o en la estructura misma.

Como antecedentes de la aplicación de la técnica de vibración ambiental están los estudios a la estructura del Hospital General de Mexicali [9]. En los últimos 20 años se le han hecho una infinidad de mediciones y se han registrado sismos en su estructura que confirman los parámetros dinámicos encontrados con vibración ambiental.

El 24 de noviembre de 1987, durante el sismo de Superstition Hills, la estructura del Hospital sufre daños severos que obligan a desalojarlo para someterlo a reforzamientos, de mayo de 1989 a diciembre de 1990. A partir de marzo de 1991 entra en funcionamiento nuevamente. El edificio se ha estudiado desde que sufrió los daños, sus etapas de reforzamiento y su puesta en funcionamiento, con instrumentación temporal y permanente, que ha permitido obtener registros de sismos en la estructura, además de una cantidad considerable de campañas de medición de vibración ambiental, que han permitido conocer las características estructurales de la misma y su evolución durante y después de eventos sísmicos.

Los datos fueron obtenidos a través de sensores de movimiento como lo son sismómetros y acelerómetros, distribuidos en la estructura y en campo libre. Se les aplicó la transformada rápida de Fourier para obtener las características dinámicas de la estructura. En combinación con estos datos se han realizado modelos computacionales de la estructura que son calibrados en base a los datos de vibración ambiental y se han obtenido resultados de cómo se comportaría la estructura ante un fenómeno sísmico.

2.3. Análisis de Fourier

El estudio de las características dinámicas de estructuras y suelos ante fenómenos sísmicos es de vital importancia tratándose de estructuras críticas, como son: escuelas, hospitales, centros de control de emergencias, etc. Estas características dinámicas (desplazamiento, velocidad y aceleración) pueden medirse a través de sensores, con los cuales se puede obtener una serie de tiempo del comportamiento del suelo y la estructura.

Una serie de tiempo puede considerarse como una función no determinística x , dependiente de una variable t . El análisis de estos datos obtenidos experimentalmente en estructuras y suelos se realiza con el apoyo de herramientas matemáticas como la transformada de Fourier, la cual permite analizar la información en el dominio de la frecuencia. Esta herramienta descompone la serie de tiempo en cada una de las frecuencias que la forman. Al poder analizar cada una de las frecuencias que contiene la serie de tiempo se puede saber cual o cuales frecuencias dominan en la serie. O en cuales frecuencias hay afinidad entre estructura y suelo.

Como la serie de tiempo contiene la información de cómo se comportó dinámicamente la estructura o suelo en un lapso de tiempo, se puede analizar en el dominio de la frecuencia el comportamiento o la respuesta del edificio y suelos ante fenómenos naturales como los sismos.

La representación de las amplitudes de estas frecuencias se le conoce como Espectro de Amplitud de Fourier (15). El espectro de amplitud de Furier es la magnitud de cada una de las amplitudes complejas de la transformada de Fourier (16) en función de la frecuencia.

$$E(\omega) = |F(\omega)| = [[R_e(F(\omega))]^2 + [I_m(F(\omega))]^2]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

Donde:

$$F(\omega) = \int_0^T \alpha(t) e^{-i\omega t} dt \quad (16)$$

$E(\omega)$ = Espectro de Amplitud de Fourier.

$F(\omega)$ = Transformada de Fourier.

$\alpha(t)$ = Serie de tiempo o sismograma.

T = Periodo (segundos).

ω = Frecuencia (radianes/segundo).

En la práctica los datos medidos son discretos, por lo que se emplea la Transformada Discreta de Fourier (17).

$$E(nf_0) = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} S(k\Delta t) e^{-i2\pi kn/N} \quad n = 0,1,2,3 \dots N/2. \quad (17)$$

Donde:

$$f_0 = \frac{1}{N\Delta t}$$

Δt = Intervalo de muestreo (segundos).

N = Potencia de 2 inmediata superior al número de puntos de la serie a transformar.

$S(k\Delta t)$ = k-ésima muestra de la serie de tiempo.

$E(nf_0)$ = n-ésima armónica de la Transformada de Fourier.

2.4. Instrumentación

La instrumentación utilizada en la adquisición de datos de vibración ambiental consta de sensores y/o transductores, así como registradores donde se hace la conversión analógico/digital y el almacenamiento de los datos. En esta sección se analizarán ambas partes.

2.4.1. Sensores y transductores

Los sensores eléctricos se definen como los dispositivos encargados de transformar energías mecánicas en energías eléctricas. En este caso, transformar el movimiento medido en velocidad de movimiento de una masa a voltajes. Su propósito es responder a la magnitud o cambios de la energía que se mide en ese tiempo. [10] [11].

Por otro lado, los transductores son dispositivos que tienen la misión de traducir o adaptar un tipo de energía en otro más adecuado para el sistema. El transductor transforma la señal que entrega el sensor en otra. Por lo general el transductor

suele incluir al sensor. Se utilizan transductores como los acelerómetros que transforman las aceleraciones de los movimientos a voltajes.

Los sensores y transductores de movimiento pueden tener por lo general de uno a tres ejes ortogonales de medición, en medición de suelos, mientras que en estructuras existen infinidad de configuraciones de acuerdo a lo que se requiere medir en ella. La configuración puede ir de 1 a 'n' canales disponibles para adquirir datos.

Los modelos de sensores y transductores que se tienen en LISAI y por lo tanto a utilizar con este equipo son los sensores de velocidad: SH-1, SV-1 de periodo intermedio, WR-1 de banda ancha de la marca Kinematics, y Mark-L4 de periodo corto de la marca MARK. Los transductores en aceleración son: WR-1 de banda ancha y FBA-23 de la marca Kinematics. Sus parámetros se describen a continuación:

- Constante de Motor. Representa el factor de conversión entre la aceleración o velocidad de la masa del sensor y el voltaje en la salida del mismo. Sus unidades son: en velocidad $V/cm/s$, en aceleración $V/cm/s^2$.
- Frecuencia Natural. Frecuencia característica del sistema elástico del sensor. Unidades Hertz (Hz).
- Amortiguamiento. Factor de amortiguamiento del sistema electromagnético-elástico del sensor, se expresa como fracción del amortiguamiento crítico.

La tabla 1 muestra los valores nominales de las especificaciones de los modelos de sensores y transductores; para cada sensor y transductor en particular de cada modelo existe una hoja de calibración del fabricante en LISAI, la cual se consulta para hacer procesamiento más detallado de los datos.

Tabla 1. Especificaciones técnicas nominales de los sensores a utilizarse.

Modelo:	Constante de Motor:	Frecuencia Natural Hz:	Amortiguamiento:	Unidad física:
Mark-L4	280 V/m/s	1.00	0.70	Velocidad
SH-1	180 V/m/s	0.20	0.70	Velocidad
SV-1	270 V/m/s	0.20	0.70	Velocidad
WR-1	$\pm 250 \text{ V/m/s}^2$	20.0	0.70	Aceleración
FBA-23	$\pm 2.50 \text{ V/m/s}^2$	50.0	0.66	Aceleración

2.4.2. Registradores comerciales

Equipos comerciales

Existen en el mercado varias firmas comerciales que ofrecen registradores y equipos completos para la adquisición de datos sísmicos. Cada una tiene una variedad de equipos para diferentes aplicaciones dentro de la sismología, sus costos son elevados en lo general y su función principal es la de adquirir datos sin hacer procesado en sitio. Algunos equipos de las principales firmas comerciales son los siguientes.

2.4.2.1. Equipos Güralp

Existen equipos especializados de esta firma comercial, pero a excepción de uno, estos son de adquisición de datos únicamente. Su programación y configuración permite ver las series de tiempo, pero no aplican procesado a los datos. [12]

El modelo CMG-DM24S12AMS aplica procesado en sitio, es de 12 canales de 24 bits con un rango de voltaje de entrada de $\pm 10 \text{ VDC}$. Su diseño es para el registro

de movimientos fuertes (sismos mayores). Tiene una computadora integrada que procesa los datos aplica transformada de Fourier y técnicas estándar para el análisis de movimientos fuertes. Su comunicación es por puerto RS-232, USB, MODEM, Ethernet. Tiene entrada de GPS. Su alimentación es de 12 VDC o 110-250 VAC.

Su diseño permite obtener resultados en sitio, utiliza la transformada de Fourier pero su aplicación es para detección de movimientos fuertes, por lo que no puede utilizarse el método de Nakamura, ya que este utiliza datos de vibraciones ambientales.

Lo atractivo de este equipo es su bajo consumo de energía, menos de 3 W sin incluir la computadora integrada, y la resolución que es de 24 bits. Su inconveniente es el volumen que es grande debido a la computadora que está integrada en el estuche.

2.4.2.2. Equipos de Kinometrics, Inc

Esta compañía tiene equipos de 18 y 24 bits, con GPS. Los hay con puerto serie, modem y UDP/IP. En tres o seis canales, tienen modelos hasta 36 canales de datos.

Son equipos especializados, pero estos son de adquisición de datos únicamente. Su programación permite ver las series de tiempo, pero no aplican procesamiento a los datos.

Sus características principales son: 18 a 24 bits de resolución, ganancias programables por canal de datos, modelos de tres y seis canales, razón de muestreo 50, 100 y 200 que varían de acuerdo al modelo y comunicación RS-232 y Ethernet.

Los costos de los equipos varían de modelo a modelo y depende del número de canales. El costo de un sistema de seis canales está por encima de \$12,000.00 USD. [13]

Sus desventajas son: equipos de precio alto, que aún utilizan la comunicación RS-232, sólo adquieren datos sin procesado en sitio.

2.4.2.3. Equipos Ref-Tek

Al igual que otras marcas especializadas la compañía REF-TEK ofrece varios productos para adquisición de datos sísmológicos de tres o seis canales a 24 bits de resolución, con bajo consumo de energía: 2.1 W si se utilizan seis canales, GPS y está en operación el disco duro. El muestreo de los datos es programable desde un mínimo de 0.1 a un máximo de 1000 muestras/segundo con 13 valores determinados. Y graba sus datos en formato PASSCAL (Program for Array Seismic of the Continental Lithosphere).

Sus ventajas, son compactos y ligeros, el almacenamiento de los datos se realiza en discos duros tipo flash de 2, 4, 8 ó 16 GB. La comunicación es por puerto RS-232 o Ethernet. Tienen programas para configurar los equipos que funcionan en Palm, laptops y estaciones de trabajo. Depende del número de canales, muestreo

y capacidad de disco duro, se pueden grabar datos en forma continua hasta por algunos meses. Esta última es su principal característica atractiva.

Como desventaja tienen sólo dos valores de ganancia 1 ó 32 veces por canal. Son para grabar datos únicamente, el proceso se realiza en laboratorio por la cantidad de datos que almacena y su formato de compresión. Tiene un paquete de programas para procesar los datos y se adquieren por separado del equipo. El cliente puede adquirir el paquete completo o parcialmente por ser modulares. [14]

2.4.3. Equipos académicos

En esta sección se hace un análisis de los trabajos desarrollados académicamente y relacionados con el tema de este proyecto.

2.4.3.1. Tesis de maestría de Arturo Pérez-Vertti Ramírez. Dirigida por M.C. Carlos Gómez Agis. "Sistema digitalizador de 24 bits para registro de señales sismológicas utilizando la tarjeta MSC1210"

La base del desarrollo de este equipo es la tarjeta de Texas Instruments MSC1210, que tiene como características principales un convertidor analógico-digital de ocho canales a 24 bits, un amplificador programable con ganancia hasta de 128, calibración de ganancia y voltaje 'off-set' (desnivel), comunicación RS-232.

Su aplicación es para adquirir datos a una razón de 40 muestras/segundo en tres canales, utiliza el puerto RS-232. Los datos los almacena directamente en la

computadora por medio de un programa de captura de datos en lenguaje C desarrollado para la plataforma LINUX.

Al igual que en la mayoría de los equipos comerciales, su diseño es para adquirir datos sismológicos únicamente.

Sus ventajas son el convertidor de 24 bits, su ganancia programable con ocho pasos de amplificación (de 1 a 128) y su bajo consumo de energía.

Como desventaja está su puerto de comunicación RS-232, el cual es prácticamente obsoleto en las computadoras portátiles. Además sólo cuenta con tres canales de datos, que en aplicaciones en edificaciones son insuficientes.

Lo interesante de este desarrollo es la realización de un sistema de adquisición de datos sismológicos con una tarjeta digital de bajo costo, para aplicaciones específicas. Desarrolla la programación del sistema en lenguaje C para la tarjeta y para el programa de captura. [15]

2.4.3.2. Tesis de Licenciatura. Guillermo Vargas Hernández. Dirigida por Dr. Fortunato Espinoza Barreras. "Diseño y construcción de un equipo para medición de vibración ambiental"

Esta tesis desarrolla un sistema de adquisición de datos. Con las siguientes características:

- Desarrollado en ambiente Matlab para la plataforma de Windows.
- Resolución del convertidor de 12 bits.
- Ganancia unitaria.

- No tiene circuito de batería, utiliza fuente de laboratorio.
- Procesa en sitio utilizando Fourier simple y no aplica técnicas de procesamiento.
- El tiempo de los registros de datos es de 30 segundos.
- Puerto de comunicación PCMCIA.

Su funcionamiento consiste en adquirir datos sismológicos y procesar los datos, aplica la transformada rápida de Fourier por medio de Matlab. Obtiene en sitio una gráfica del espectro de Fourier de los datos medidos. El documento no explica como realiza el procesamiento y que técnica se utiliza.

La longitud de los registros de datos es por lo general de 30 segundos, no aplica ganancia, si no cambia el voltaje de referencia del convertidor para aumentar su sensibilidad. Lo que no es práctico, lo más recomendable es tener ganancias antes del convertidor. La razón de muestreo es de 2000 muestras/segundo y tiene algunos problemas de ruido que no puede eliminar con el filtro pasa bajas de 50 Hz tipo elíptico, ya que la frecuencia de ruido es en 16 Hz.

Por la fecha de desarrollo y resultados, técnicamente no aporta contribución al desarrollo de este trabajo.

Las desventajas de este proyecto: utiliza una fuente de laboratorio para alimentarse, al no contar con un sistema de energía propio, lo cual pone en riesgo el equipo al tener un descuido en su alimentación. Su comunicación con la computadora se realiza a través de un puerto PCMCIA. No tiene opción de ganancias, en su caso baja el voltaje de polarización del convertidor para aumentar su resolución. [16]

2.5. Sumario

Ahora se conoce que existen diferentes tipos de ondas sísmicas, cómo se propagan por el medio, cuáles son sus fuentes y efecto inducido en la superficie que se relaciona con las características físicas y geométricas de los materiales cercanos al sitio de medición. También lo que se llama efecto de sitio en suelos, en particular el periodo dominante. Así como estos periodos fundamentales del suelo se acoplan con las frecuencias características de las estructuras.

Por ello es necesario medir estos movimientos producidos por las ondas sísmicas tanto en suelos como en estructuras, con sensores, transductores de movimiento y registradores de datos actualizados a la tecnología actual. Enseguida aplicar la transformada de Fourier a los datos obtenidos para obtener los periodos dominantes del suelo, o frecuencias características de las estructuras entre otros parámetros.

En el caso de suelos, se aplica el método de Nakamura, que utiliza datos de vibración ambiental para obtener el periodo dominante del suelo en el sitio de medición y en estructuras técnicas de identificación de sistemas documentadas.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Introducción

En este capítulo se describen los elementos constituyentes del sistema, las herramientas utilizadas para el mismo y los procedimientos llevados a cabo para el desarrollo del programa en Labview.

3.2. Elementos del sistema

En diagrama a bloques de la figura 5, se muestran los elementos que constituyen un sistema de adquisición de datos sísmicos, estos son: Módulo de adquisición; se realiza la adquisición y almacenamiento de los datos, GPS, sensores; que pueden ser sismómetros y acelerómetros, cableado, sistema de alimentación; por corriente alterna o baterías, y computadora.

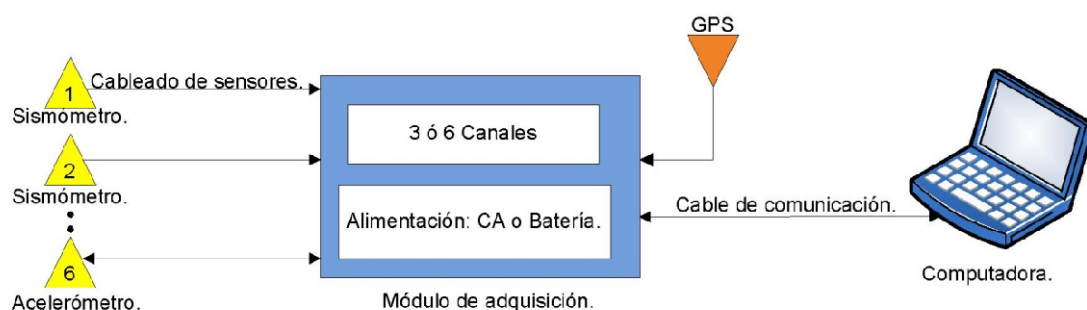


Figura 5 . Diagrama a bloques de un sistema de adquisición de datos sísmicos.

En la figura 6 se muestran los elementos que constituirán el sistema de adquisición de datos sísmicos de este proyecto. A excepción del módulo de adquisición y el programa en Labview, el cableado, sensores, GPS y computadora ya se utilizan en el LISAI como parte de otros sistemas de adquisición; y en este proyecto también se utilizarán. En cuanto al módulo de adquisición es el que más se apega a las características y costos para el LISAI.

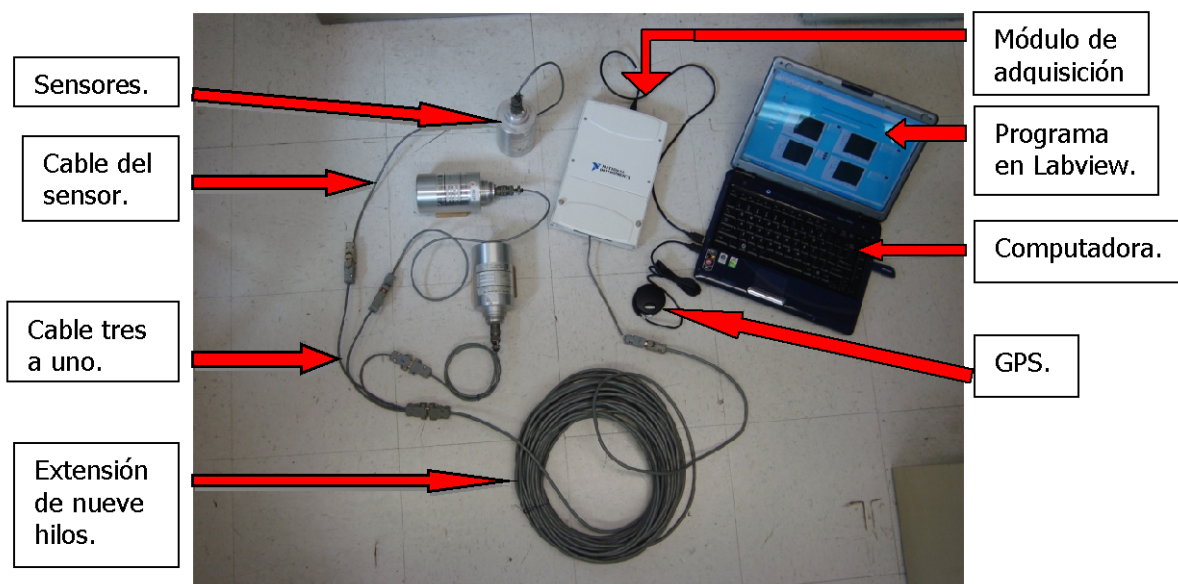


Figura 6. Elementos del sistema de adquisición.

3.2.1. Módulo de adquisición

El módulo de adquisición de datos (figura 7) es el modelo USB-6229 de National Instruments, con 32 canales analógicos de entrada en modo referenciado a tierra o 16 en modo diferencial, de los cuales se utilizan nueve para este trabajo, a una resolución de 16 bits. El muestreo no es simultáneo y es de máximo 250 000 muestras por segundo. Su puerto de comunicación con la computadora es USB 2.0.

La alimentación esta en el rango de 11-30 VDC, su funcionamiento se realiza a 12 VDC con eliminador de AC o batería de 12 V. La conexión del cableado de los sensores es del tipo tornillo.



Figura 7. Módulo de adquisición de datos.

3.2.2. GPS18 USB

El GPS18 USB es mostrado en la figura 8, es de la marca Garmin, su operación se realiza a través de un puerto USB donde toma su energía para funcionar y transmitir datos. La tabla 2 muestra las características eléctricas y de operación del dispositivo.



Figura 8. GPS18 con conector USB.

Tabla 2. Características eléctricas y de operación del GPS 18 USB.

Descripción:	Parámetros:
Longitud de cable.	2 m
Puerto.	USB
Voltaje de entrada.	4.4-5.5 VDC
Corriente de entrada.	110 mA
Sensibilidad del receptor.	-185 dbW mínimo
Temperatura de operación.	-30°C a 80°C
Tiempos de adquisición: • Readquisición. • En operación. • Calentando. • En frío.	Menos de 2 segundos Aprox. 1 segundos Aprox. 38 segundos Aprox. 45 segundos
Velocidad de actualización.	1 registro por segundo
Precisión: • GPS estándar. • WASS activado.	Posición <15 m Posición <3 m

3.2.2.1. Formato de lectura GPGGA

El GPS18 USB tiene varias líneas con formatos de información. Una de estas líneas es el formato GPGGA donde entrega los datos de tiempo y posición que interesan a este proyecto.

El formato de los datos GPGGA que entrega el GPS es el siguiente:

\$GPGGA,103456,3250.899,N,11620.300,W,1,08,0.9,32.3,M,46.9,M, ,*41

La tabla 3 muestra el desglose del formato GPGBA.

Tabla 3. Formato GPGBA.

Composición	Descripción:
\$GPGBA	Global Positioning System Fix Data.
103456	10:34:56 UTC.
3250.899,N	Latitud 32° 50.899´ N.
11620.300,W	Longitud 116° 30.300´ W.
1	Calidad: 0 = invalido. 1 = GPS fix (SPS). 2 = DGPS fix. 3 = PPS fix. 4 = Tiempo real Kinematic. 5 = Float RTK. 6 = Estimado (dead reckoning). 7 = Modo de entrada manual. 8 = Modo simulación.
08	Número de satélites utilizados.
0.9	Debilitamiento horizontal de la posición.
32.3,M	Altitud en metros respecto a la media del nivel del mar.
46.9,m	Altura de geoid (media del nivel del mar) anterior WGS84.
	Vacios.
	Vacios.
*41	`Checksum', siempre después del *.

3.2.3. Sismómetros

Los sismómetros a utilizar para este equipo son actualmente el modelo L-4 de Mark (figura 9) en sus versiones horizontal y vertical, y los modelos SH-1, SV-1 (figura 10) y WR-1 (figura 11) en modo de velocidad de Kinematics. En el capítulo II, se muestran las especificaciones técnicas nominales de estos sensores.



Figura 9. Sismómetros de la marca Mark modelo L-4.



Figura 10. Sismómetros de la marca Kinematics modelos SH-1 y SV-1.



Figura 11. Sismómetros WR-1 en modo de velocidad de Kinematics.

3.2.4. Acelerómetros

Los acelerómetros con que se cuentan al momento del desarrollo de este trabajo son los WR-1 uniaxiales en modo de aceleración (figura 12), triaxial FBA-23 de Kinemetrics (figura 13) y los modelos SA-111 de Terra Technology (figura 14) uniaxiales. En el capítulo II, se muestran las especificaciones técnicas nominales de estos transductores.



Figura 12. Acelerómetros WR-1 de la marca Kinemetrics.

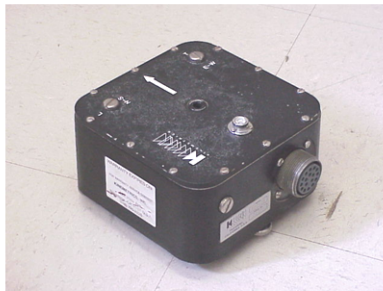


Figura 13. Acelerómetros triaxiales FBA-23 de la marca Kinemetrics.

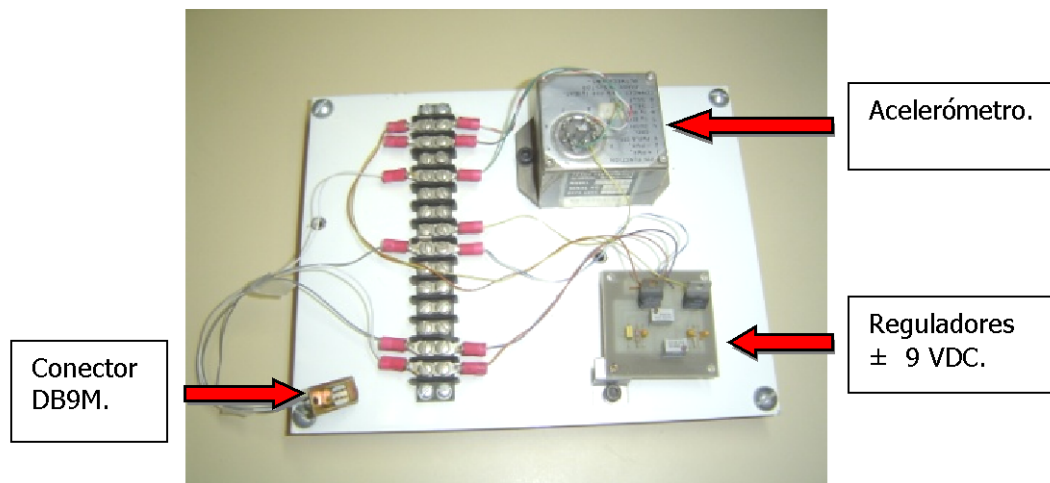


Figura 14. Acelerómetros SA-111 de Terra Technology (placa demostrativa).

Las características eléctricas de los acelerómetros para su operación se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Características eléctricas de acelerómetros utilizados.

Acelerómetro:	Voltaje:	Corriente:
WR-1	± 12 VDC	± 15 mA
FBA-23	± 12 VDC	± 15 mA
SA-111	± 9 VDC	

3.2.5. Cableado

El cableado está compuesto por: el cabezal que es el cable conectado directamente al módulo de adquisición; extensiones; tres a uno (une el cable de tres sensores y lo concentra a un sólo cable); el cable del sensor. Los conectores entre el cabezal y el cable del sensor son de tipo DB9 machos y hembras.

El tipo de cable es de la marca Belden para instrumentación, de cuatro y nueve hilos:

- El de cuatro hilos es de dos pares trenzados y blindado por pares con papel aluminio, incluye cable de chasis.
- El cable de nueve hilos es forrado totalmente con papel aluminio y con cable de tierra.

El calibre de cada hilo es del 24 AWG (American Wire Gage) y su forro exterior es de PVC-Polyvinyl Chloride.

Las longitudes de los cables son variadas, los cables de los sensores son un metro, en el caso especial de los WR-1 son de cuatro metros. En cuanto a las extensiones con cuatro o nueve hilos hay de 20 y 30 metros en su mayoría.

La figura 15 muestra la configuración de los conectores que salen del módulo de adquisición, para que todo el cableado existente y sensores sean compatibles.

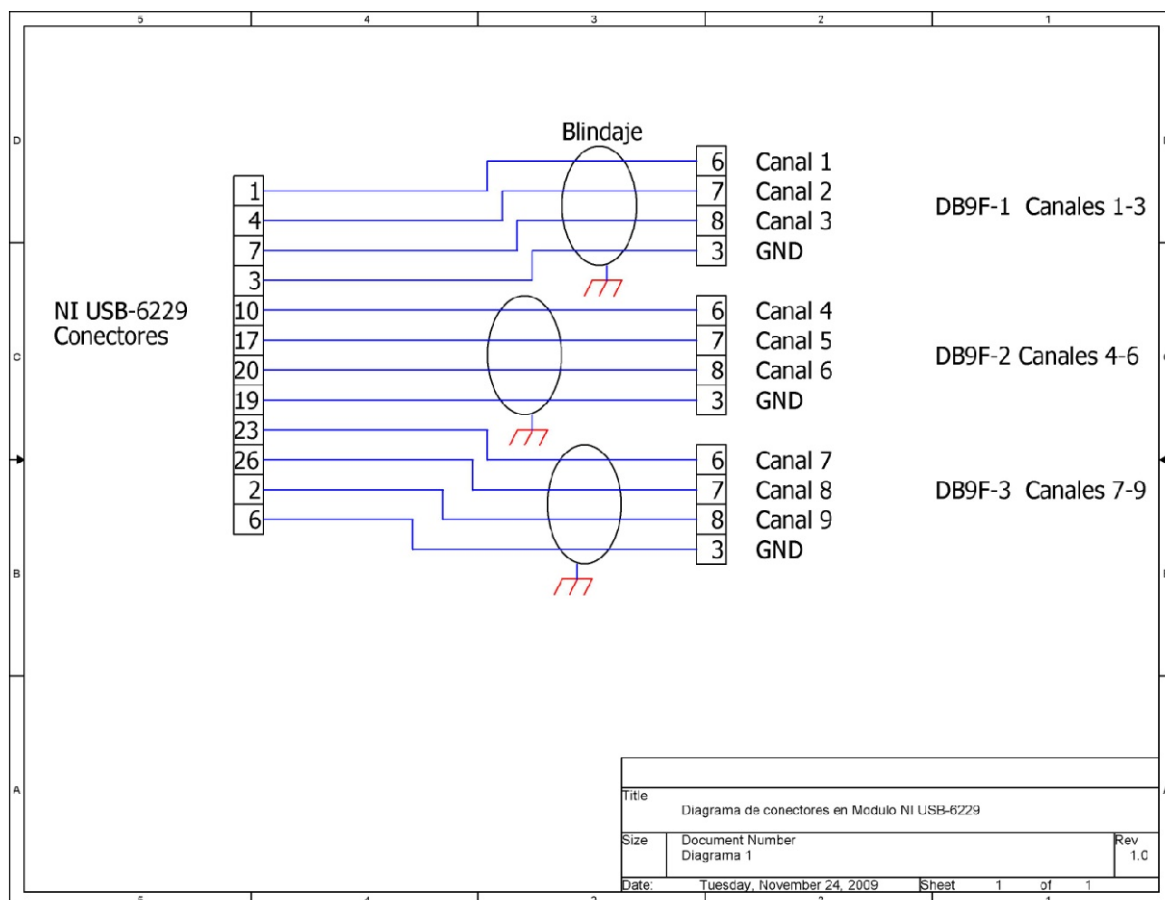


Figura 15. Configuración de los conectores DB9-F del módulo de adquisición.

En el diagrama a bloques que se muestra en la figura 16, se presenta el esquema general para conectar el sistema para utilizar sismómetros y acelerómetros. El módulo de adquisición puede operar con el módulo de batería en ambos casos, pero es necesario para alimentar a los acelerómetros.

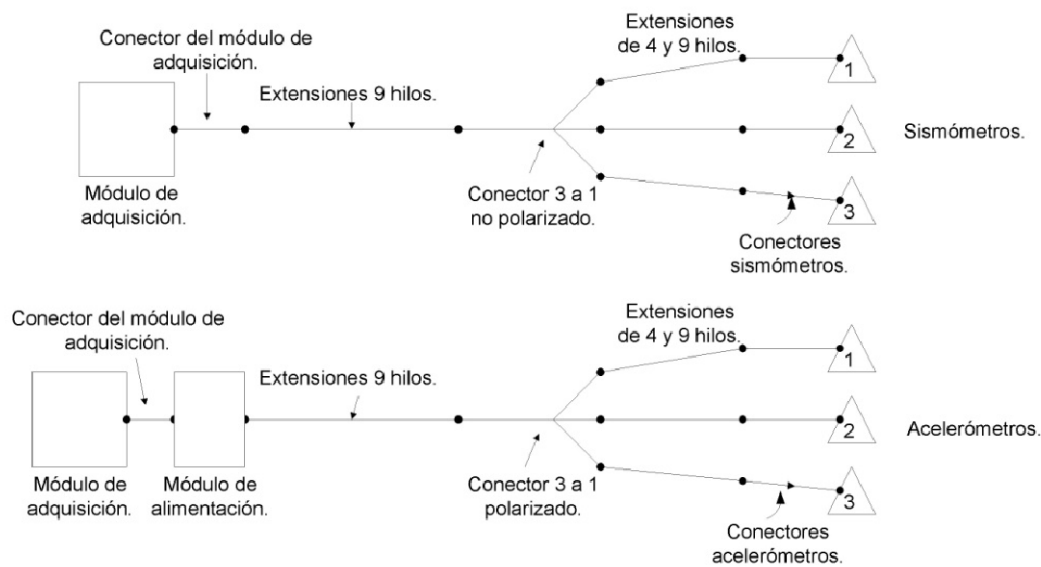


Figura 16. Diagrama general de conexión entre módulo y sensores.

3.2.6. Módulo de alimentación

El módulo de alimentación provee voltaje de +12 VDC al módulo de adquisición si se trabaja en lugares sin voltaje de corriente alterna. También provee de voltajes de polarización de ± 12 VDC al utilizar acelerómetros. Con una corriente máxima de ± 415 mA.

Este módulo opera con una o dos baterías de 12 V y 7 Ah, que alimentan a un convertidor DC-DC para obtener ± 12 VDC con los que se alimentan a los acelerómetros, también se podrán utilizar baterías de carro para alimentar este módulo. La figura 17 muestra el diagrama esquemático de este módulo, donde se indica la finalidad de cada conector.

Se utilizan dos reguladores de voltaje para suministrar ± 2.5 VDC a los filtros analógicos, el voltaje de entrada para estos reguladores se toma de convertidos DC-DC.

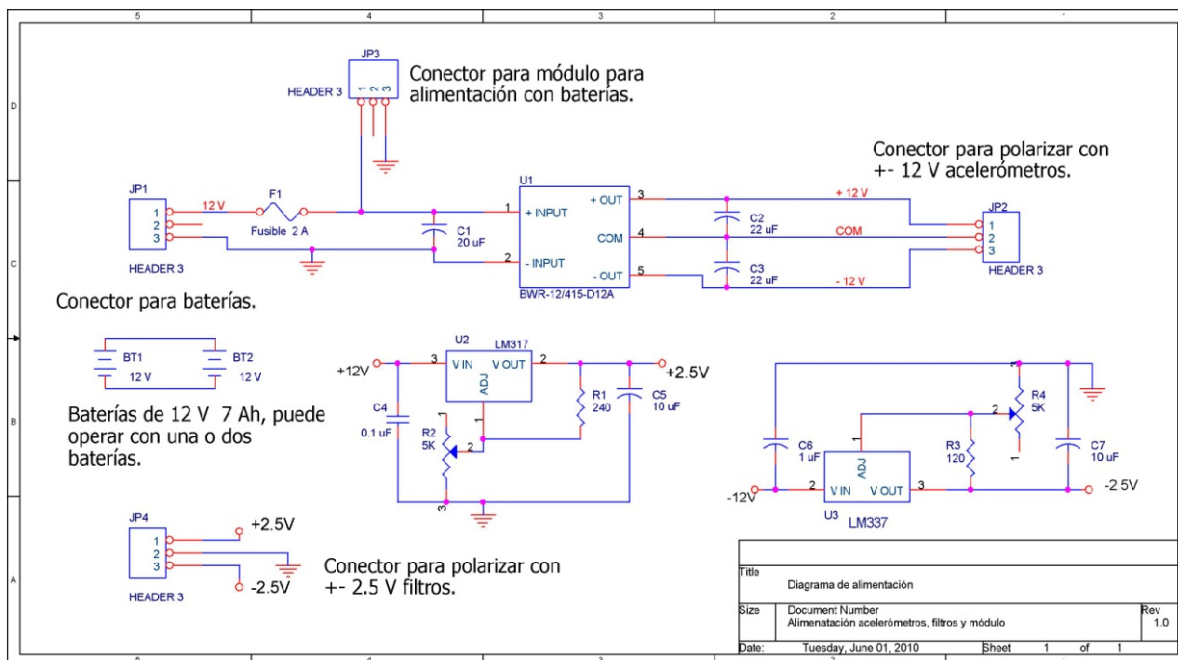


Figura 17. Diagrama esquemático del módulo de alimentación por batería.

3.2.7. Computadora

La computadora para operar el equipo es del tipo portátil, con al menos 2 puertos USB 2.0, uno para la comunicación con el módulo de adquisición y el otro para la antena de GPS. Con memoria RAM de 2GB como mínimo y procesador de doble núcleo con una velocidad de 2 GHz para soportar el sistema operativo Windows XP, así como el programa Labview 8.6. El disco duro mínimo de 80 GB, tanto para el sistema operativo y programas, como para el almacenamiento de los datos.

3.2.7.1. Capacidad de almacenamiento de datos

La capacidad de almacenamiento del equipo de adquisición está limitada al espacio disponible de disco duro. Cada archivo de 180 segundos, con nueve canales de

datos a 100 muestras/segundo tiene un peso de 1850 Kb en formato ASCII, que dan un aproximado de 540 archivos o 27 horas por cada GB de espacio libre de disco duro.

3.2.8. Sistema operativo

El sistema operativo en el cual se está desarrollando el proyecto es Windows XP.

3.2.9. Labview

El programa Labview es la plataforma de desarrollo del programa para operar el sistema. La versión utilizada es la 8.6.

3.2.10. Archivo de datos

Los archivos de datos generados por el sistema están en formato ASCII, con un encabezado en el que se encuentra la hora y fecha de la computadora, datos de GPS (ver tabla 3), número de canales, número de muestras por segundo, las columnas con los datos donde la primera columna es el tiempo y las siguientes nueve son las amplitudes en volts de cada uno de los nueve canales respectivamente. En la figura 18 se muestra un archivo con el encabezado y las columnas de datos.

pru-28oct09_016 - Notepad

File Edit Format View Help

LabVIEW Measurement
 Writer_Version 2
 Reader_Version 2
 Separator Tab
 Decimal_Separator .
 Multi_Headings No
 X_Columns One
 Time_Pref Absolute
 Operator Rogelio
 Date 2009/10/28
 Time 13:17:06.9475
 End_of_Header

Channels 9
 Samples 18000 18000 18000 18000 18000 18000 18000 18000 18000
 Date 2009/10/28 2009/10/28 2009/10/28 2009/10/28 2009/10/28 2009/10/28 2009/10/28 2009/10/28 2009/10/28
 Time 13:20:06.953125 13:20:06.953125 13:20:06.953125 13:20:06.953125 13:20:06.953125 13:20:06.953125 13:20:06.953125 13:20:06.953125 13:20:06.953125
 Y_Unit_Label Volts Volts Volts Volts Volts Volts Volts Volts Volts
 X_Dimension Time Time Time Time Time Time Time Time Time
 X0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0
 Delta_X 0.010000 0.010000 0.010000 0.010000 0.010000 0.010000 0.010000 0.010000 0.010000
 End_of_Header

X_Value	Canal_1	Canal_2	Canal_3	Canal_4	Canal_5	Canal_6	Canal_7	Canal_8	Canal_9	Comment
0.000000	-0.191942	-0.192751	-0.192265	-0.192265	-0.192265	-0.192265	-0.192265	-0.192265	-0.192265	0.023544
0.010000	-0.158915	-0.157781	-0.158105	-0.158105	-0.158105	-0.158105	-0.158105	-0.158105	-0.158105	0.109673
0.020000	-0.101927	-0.102412	-0.101765	-0.101765	-0.101765	-0.101765	-0.101765	-0.101765	-0.101765	0.102549
0.030000	-0.031663	-0.030530	-0.030854	-0.030854	-0.030854	-0.030854	-0.030854	-0.030854	-0.030854	0.102549
0.040000	0.044590	0.044105	0.044590	0.044590	0.044590	0.044590	0.044590	0.044590	0.044590	0.058028
0.050000	0.113720	0.113073	0.113720	0.113720	0.113720	0.113720	0.113720	0.113720	0.113720	0.005897
0.060000	0.166013	0.166661	0.166499	0.166499	0.166499	0.166499	0.166499	0.166499	0.166499	0.039733
0.070000	0.195964	0.196450	0.195640	0.195640	0.195640	0.195640	0.195640	0.195640	0.195640	-0.000255
0.080000	0.197907	0.198878	0.198393	0.198393	0.198393	0.198393	0.198393	0.198393	0.198393	-0.000255
0.090000	0.173299	0.172813	0.172489	0.172489	0.172489	0.172489	0.172489	0.172489	0.172489	0.009160
0.100000	0.122787	0.123434	0.122949	0.122949	0.122949	0.122949	0.122949	0.122949	0.122949	0.041352
0.110000	0.055923	0.055437	0.055599	0.055599	0.055599	0.055599	0.055599	0.055599	0.055599	0.058190
0.120000	-0.019521	-0.019197	-0.019521	-0.019521	-0.019521	-0.019521	-0.019521	-0.019521	-0.019521	0.060618
0.130000	-0.091403	-0.091242	-0.092213	-0.092213	-0.092213	-0.092213	-0.092213	-0.092213	-0.092213	-0.342430E-5
0.140000	-0.151305	-0.151144	-0.150172	-0.150172	-0.150172	-0.150172	-0.150172	-0.150172	-0.150172	0.131853
0.150000	-0.187894	-0.189028	-0.188704	-0.188704	-0.188704	-0.188704	-0.188704	-0.188704	-0.188704	0.131853
0.160000	-0.200846	-0.199875	-0.200360	-0.200360	-0.200360	-0.200360	-0.200360	-0.200360	-0.200360	0.098340
0.170000	-0.184171	-0.183847	-0.184494	-0.184494	-0.184494	-0.184494	-0.184494	-0.184494	-0.184494	0.140595
0.180000	-0.141592	-0.141592	-0.141268	-0.141268	-0.141268	-0.141268	-0.141268	-0.141268	-0.141268	0.127158
0.190000	-0.079747	-0.078775	-0.078290	-0.078290	-0.078290	-0.078290	-0.078290	-0.078290	-0.078290	0.083607
0.200000	-0.005598	-0.005598	-0.005598	-0.005598	-0.005598	-0.005598	-0.005598	-0.005598	-0.005598	0.100283
0.210000	0.067580	0.068065	0.068713	0.068713	0.068713	0.068713	0.068713	0.068713	0.068713	0.013506
0.220000	0.132662	0.133958	0.132824	0.132824	0.132824	0.132824	0.132824	0.132824	0.132824	0.011077
0.230000	0.178965	0.179289	0.179289	0.179289	0.179289	0.179289	0.179289	0.179289	0.179289	-0.084280
0.240000	0.199850	0.199850	0.200497	0.200497	0.200497	0.200497	0.200497	0.200497	0.200497	-0.122650
0.250000	0.192726	0.192241	0.193536	0.193536	0.193536	0.193536	0.193536	0.193536	0.193536	-0.031178
0.260000	0.159375	0.158404	0.159052	0.159052	0.159052	0.159052	0.159052	0.159052	0.159052	0.081690
0.270000	0.102226	0.102711	0.102549	0.102549	0.102549	0.102549	0.102549	0.102549	0.102549	0.050605

Ln 1, Col 1

Figura 18. Ejemplo de un archivo de datos.

3.3. Equipo utilizado

En esta sección se describen los equipos y herramientas utilizadas para el desarrollo de este proyecto.

3.3.1. Osciloscopio

El osciloscopio utilizado es de la marca Leader modelo DMM/SCOPE 30MS/S 300 de dos canales, con probador lógico y multímetro integrado. La figura 19 muestra el osciloscopio el cual opera con baterías o eliminador de corriente.

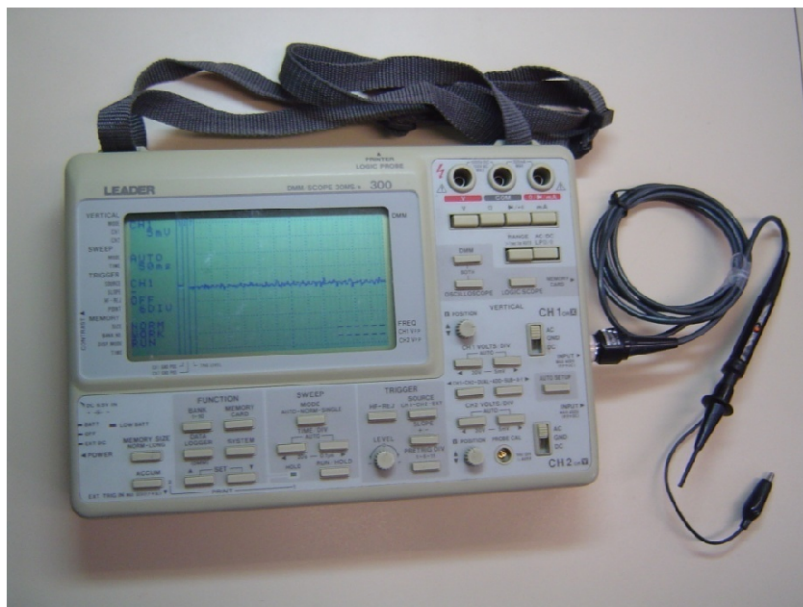


Figura 19. Osciloscopio portátil de 2 canales.

Se utiliza para verificar las señales que entrega el generador de funciones, y que estén presentes en la entrada de cada canal del módulo de adquisición. Así como las señales que salen de los sensores.

Por sus características, también se utilizó como multímetro.

3.3.2. Generador de funciones

El generador de funciones mostrado en la figura 20, es de la marca HP modelo 33120A, el cual tiene la característica de generar señales senoidal, diente de sierra, triangular, cuadrada y de ruido.



Figura 20. Generador de funciones HP 33120A.

Sus principales características se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Características del generador de funciones HP 33120A.

	Frecuencia:	Amplitud:
Rango:	10 μ Hz - 15 MHz	50 mVpp - 10Vpp
Resolución:	10 μ Hz	1 mV

Con este generador se hacen pruebas para verificar que las frecuencias y amplitudes suministradas al módulo de adquisición, y que el programa del sistema funcione correctamente. El procedimiento es suministrar una frecuencia y amplitud conocidas para ser muestreada, en procesos paralelos la señal es:

- a) Graficada la serie tiempo.
- b) Transformada al dominio de la frecuencia y graficada.
- c) Filtrada, transformada al dominio de la frecuencia y graficada.
- d) Almacenada en un archivo en formato ASCII.

Con los procesos anteriores se verifica que cada sección de la programación funcione correctamente.

También se utilizó para comparar los procesos entre este sistema y los ya existentes en el laboratorio. Se comparan las series de tiempo y espectros.

3.3.3. Multímetros

Multímetros utilizados son de la marca Fluke modelo 77 de mano ilustrado en la figura 21, y de banco el modelo 8842A ilustrado en la figura 22. La tabla 6 muestra las principales características de estos multímetros.



Figura 21. Multímetro de mano marca Fluke, modelo 77.



Figura 22. Multímetro de banco Fluke.

Tabla 6. Características principales de los multímetros Fluke.

Características:	Fluke 77:	Fluke 8842A:
Voltaje Rango	0-1000 VDC	0 -1000 VDC
Resolución	0.1 mVDC	0.1 μ V
Corriente rango	0-10 A	0-2 A
Resolución	0.1 mA	1 μ A
Resistencia rango	0 – 32 M Ω	0-20 M Ω
Resolución	0.1 Ω	0.1 m Ω

Estos multímetros se utilizan para verificar que los voltajes estén presentes en el módulo de alimentación, y que estos lleguen a los acelerómetros, así como verificar continuidad en el cableado.

3.4. Procedimientos

En esta sección se describe el desarrollo de los procedimientos llevados a cabo para realizar el programa del sistema de adquisición, las pruebas realizadas y sus resultados.

3.4.1. Lugar de pruebas

Las primeras pruebas del sistema se realizaron en el laboratorio LISAI, para ello se utilizaron el generador de funciones y los sismómetros. Se inició con un solo canal para entender el funcionamiento de la programación en Labview y el módulo de adquisición. Conforme se avanzaba en la programación se trabajó con tres canales

para pruebas, y finalmente se agregaron los seis canales restantes para hacer pruebas con los nueve canales en funcionamiento.

Una vez que el sistema se validó en laboratorio, se procedió a probarlo en campo, esto es fuera del laboratorio, se llevó a la azotea del edificio y a terrenos baldíos donde comúnmente se hacen mediciones, con el fin de verificar y validar su funcionamiento.

3.4.2. Desarrollo del programa

A continuación se describen cada uno de los procedimientos y avances en el desarrollo del programa para la adquisición y procesamiento de los datos.

3.4.2.1. Procedimiento 1

El primer programa que se realizó es el que se muestra en las figuras 23 y 24, la carátula que el usuario observa es la mostrada en la figura 23. Este programa se realizó para entender el funcionamiento de la programación en Labview y el módulo de adquisición. En la programación, se analizó el funcionamiento de controles y funciones del Labview que permiten el control del módulo de adquisición, el cálculo de espectros, la escritura de archivos y el manejo de gráficas, lo que constituye la parte fundamental del diseño.

En el lado izquierdo de la figura 23 se muestra una señal de 2 Hz a 200 mV_{pp} la cual fue obtenida del generador de funciones, esta señal se introdujo al módulo de adquisición y fue procesada para graficarla, así mismo el cálculo de la

transformada de Fourier fue hecha en Labview y su gráfica resultante se muestra en la parte derecha de la figura 23.

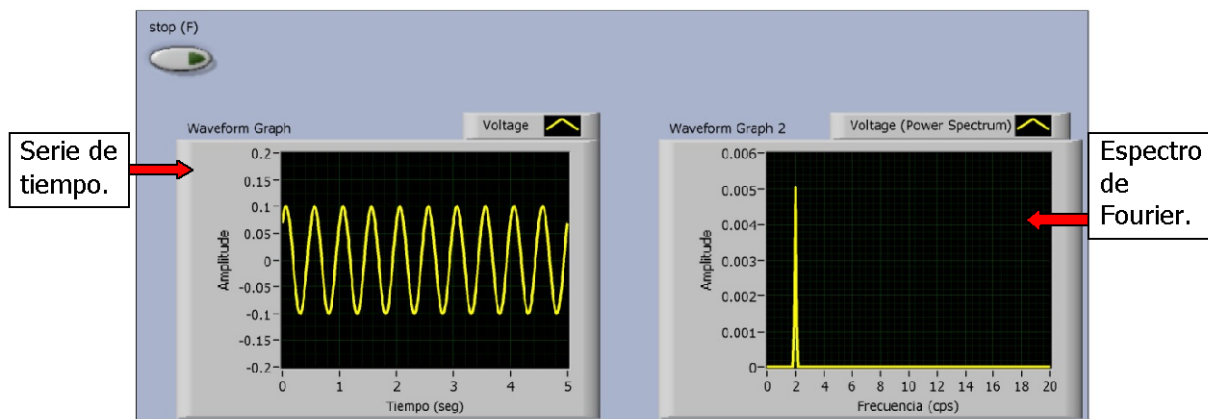


Figura 23. Carátula del programa, se grafica serie de tiempo y espectro de Fourier.

En la figura 24 se muestra la programación gráfica en Labview correspondiente a las señales obtenidas en la figura 23. Este programa controla el módulo de adquisición, grafica la serie de tiempo de la señal muestreada, obtiene su espectro y lo grafica, y graba los datos muestreados. Cada uno de estos módulos se configura de acuerdo a los procesos que se desean aplicar de los datos.

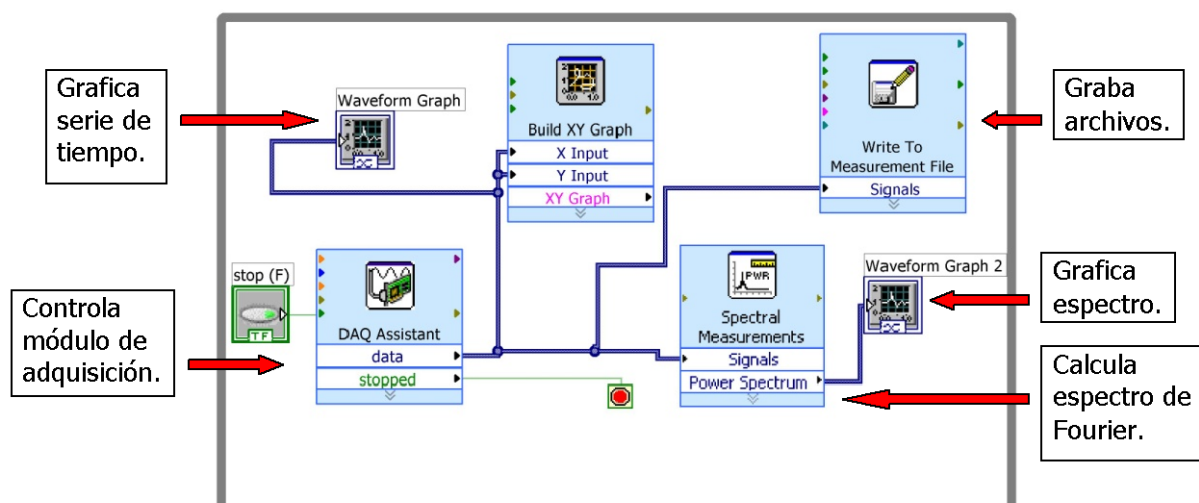


Figura 24. Programa: adquisición, procesamiento, grabado de datos, visualización.

3.4.2.2. Procedimiento 2

En este segundo procedimiento se agregaron controles de número de muestras a adquirir, razón de muestreo y selección de trayectoria donde se grabaran los datos adquiridos. La figura 25 muestra la carátula con estos controles. Los valores de estos controles son de prueba y los rangos son: para el control número de muestras de 100 a 18000 muestras en incrementos de 100, para el control de razón de muestreo es de 50 a 1000 muestras con incrementos de 50. La trayectoria donde se graban los datos queda fija en el módulo de control para grabar los datos.



Figura 25. Carátula con controles de muestras.

El control del módulo de adquisición de la figura 26, funciona con número de muestras a adquirir y cuantas muestras por segundo, por lo tanto, el tiempo de adquisición de datos depende del número de muestras y razón de muestreo. Por ejemplo si las muestras a tomar son 1000 y la razón de muestreo es de 100 muestras/segundo el tiempo de adquisición es de 10 segundos.

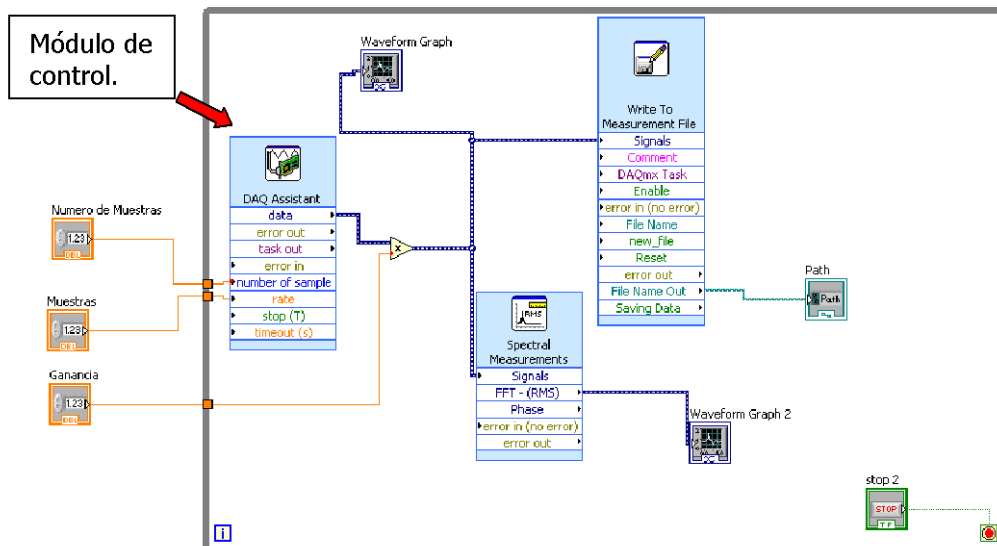


Figura 26. Programa del procedimiento 2 con utilización de controles.

3.4.2.3. Procedimiento 3

El programa de la figura 27 tiene grandes avances para el desarrollo del proyecto, y en este punto, están en funcionamiento los nueve canales de datos. Para esto se agregó el control para el manejo de varias carátulas, lo cual permite que el usuario pueda seleccionar la carátula a visualizar. El programa utiliza otras funciones para poder graficar en forma independiente las series de tiempo y espectros de Fourier de cada canal, además de la aplicación de filtros y el control para indicar la trayectoria donde el usuario quiere grabar los datos.

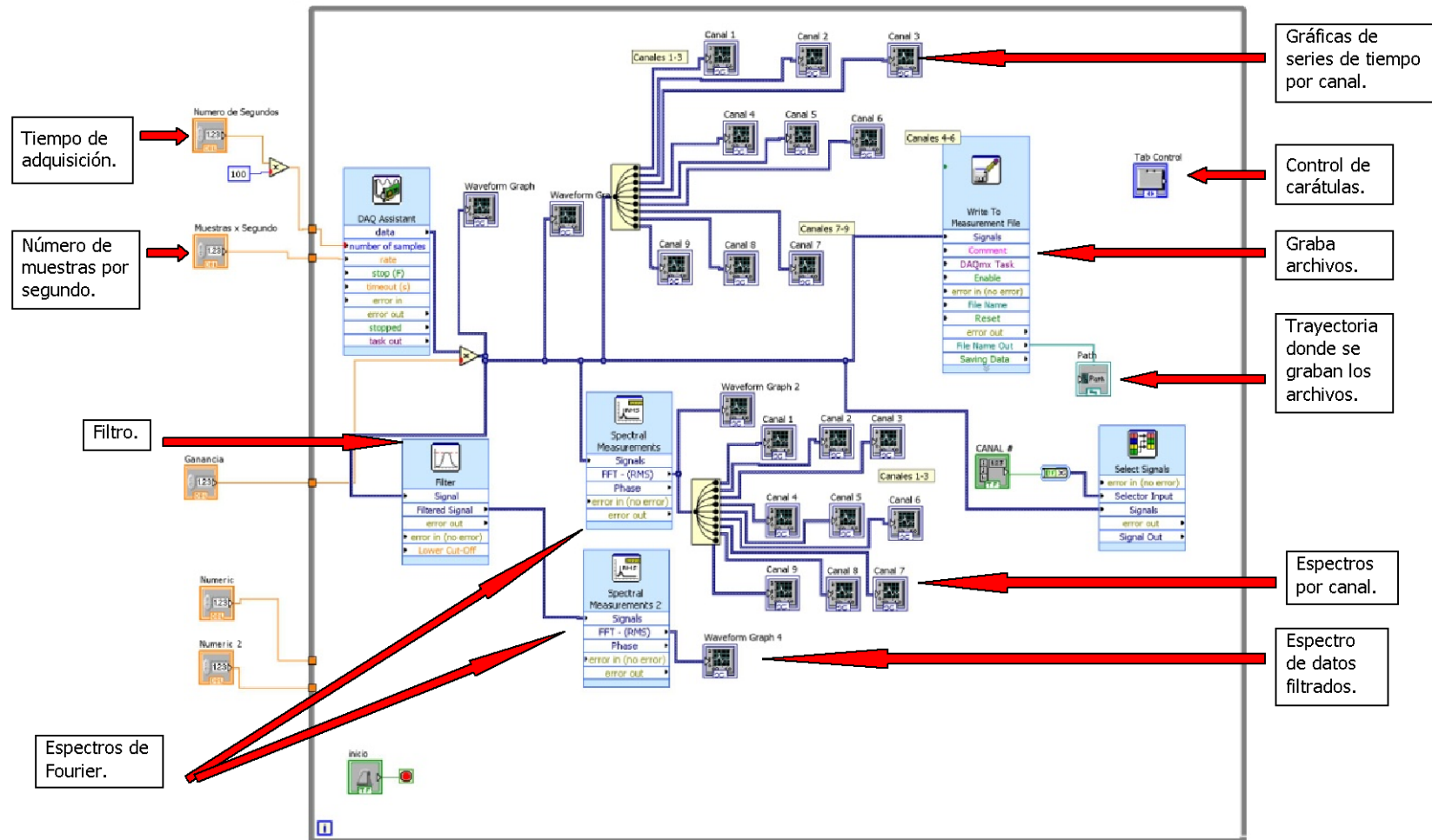


Figura 27. Programa del procedimiento 3, se utiliza separación de canales y filtros.

En la carátula principal que se muestra en la figura 28, se encuentran los parámetros de operación del sistema. El control de número de muestras a adquirir se cambio a tiempo de adquisición, ya que esto es lo más común en equipos de uso sismológico. Se agregaron también dos gráficas, una en la cual se presentan los mismos nueve canales en el tiempo y otra el espectro de estos nueve canales filtrados a una frecuencia de corte de 30 Hz con un filtro digital de respuesta infinita al impulso (IIR por sus siglas en ingles) tipo Butterworth de orden 10. La finalidad de utilizar el filtro es para probar su funcionamiento y hacer algunas pruebas de ruido.

Para probar el filtro, se suministraron señales de diferentes frecuencias entre DC y 50 Hz, las cuales fueron obtenidas del generador de funciones. Se observó que arriba de la frecuencia de corte las señales eran filtradas.

Al configurar el módulo de adquisición a nueve canales y tomar datos sólo en tres de ellos de una señal conocida, se dejaron los otros seis abiertos, se observó que el sistema adquiere señales no deseadas en estos canales que quedaron abiertos, como se muestra en el espectro sin filtro en la parte superior derecha de la figura 28. En el espectro con filtro parte inferior derecha de la misma figura, se observa que el canal 1 no se contaminó con estas señales de ruido.

Para evitar que los canales que no se utilizan en la medición, adquieran ruido, se hizo un conector que los pone a tierra.

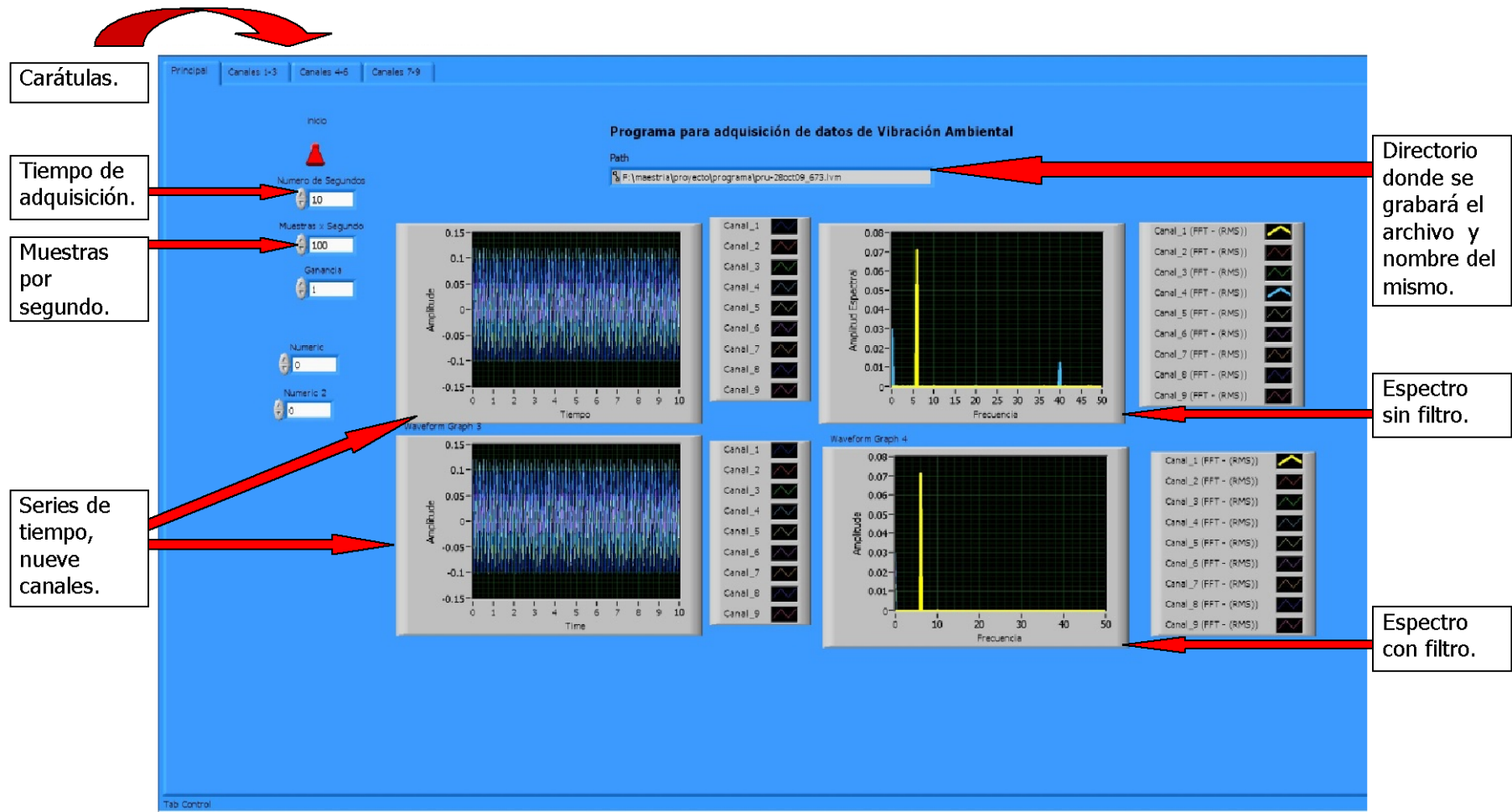


Figura 28. Carátula principal, donde se analiza filtro.

La figura 29 muestra la carátula para visualizar los canales 1, 2 y 3 en tiempo y en frecuencia de forma individual. Se tienen dos carátulas similares para los canales 4, 5, 6 y 7, 8, 9, respectivamente. Se agrupan en grupos de tres canales porque en la adquisición de datos sísmicos se utilizan triaxiales (dos horizontales y un vertical) además de que permite tener una mejor visualización de las graficas obtenidas.

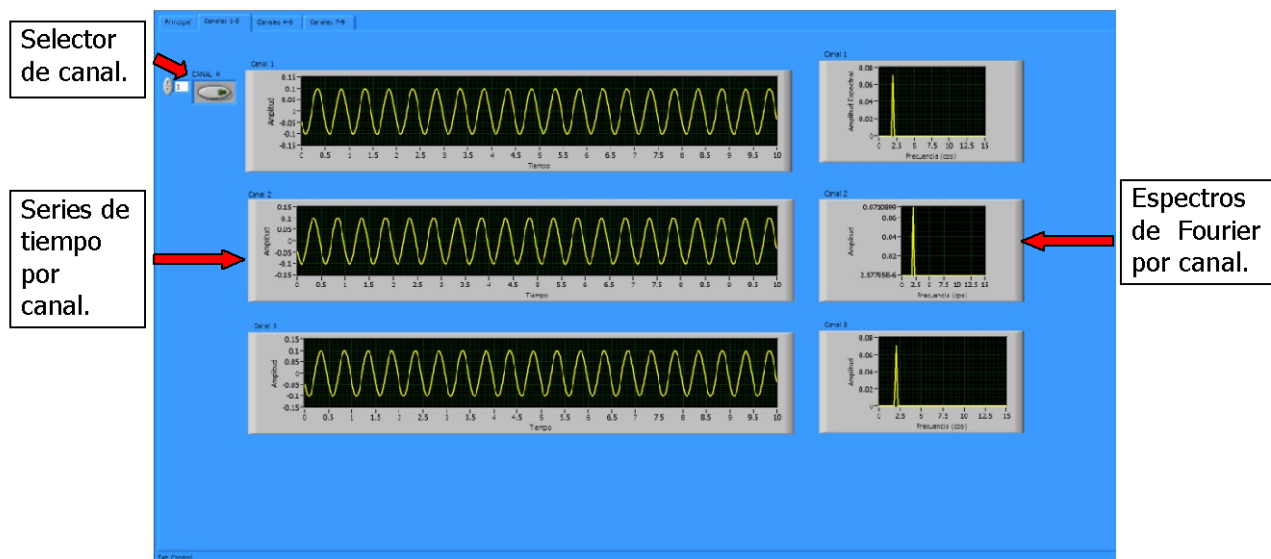


Figura 29. Carátula para los canales 1, 2, 3.

3.4.2.4. Procedimiento 4

Prueba de armónicos

Debido a que las frecuencias de aplicación sismológica son de baja frecuencia, del orden de 0.1 a 20 Hz, son susceptibles a contaminarse con ruido de otras frecuencias como lo son los 60 Hz del voltaje alterno, el ruido de las lámparas fluorescentes, motores, etc., por lo cual, se requieren filtros de fase cero para que

minimicen estas señales no deseadas y a su vez no deformen la señal muestreada, sobre todo en su fase. En aplicaciones sismológicas es importante que la fase de la señal no se altere.

En este procedimiento se implementó un filtro de fase cero y se continuó con las pruebas, se suministraron señales arriba de la frecuencia de muestreo, en la frecuencia de 120 Hz por ejemplo: se observó que el sistema adquiere los armónicos de esta. En el espectro sin filtro parte superior derecha de la figura 30, se muestran armónicos de la frecuencia de 120 Hz con frecuencia de 20 Hz y en 40 Hz el ruido proveniente de los canales abiertos. Al hacer el filtrado de la señal de 120 Hz, se observa en el espectro con filtro de la figura 30, parte inferior derecha, que el armónico de esta frecuencia no se puede filtrar por lo cual los datos son contaminados.

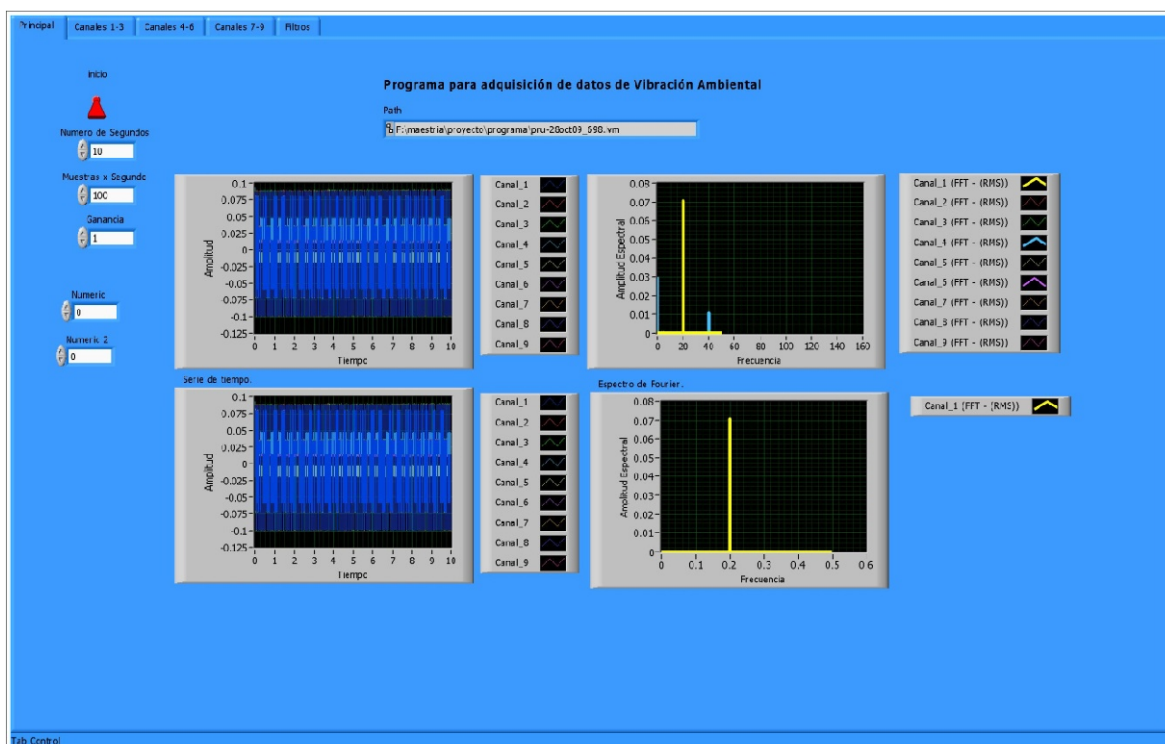


Figura 30. Comparación de señales con y sin filtro, frecuencia de entrada 120 Hz.

Puesto que el módulo de adquisición de datos NI-USB-6229 no tiene filtros anti-alias antes del muestreo, se sobre muestrean las señales de entrada, se utilizan filtros digitales, y se hace un diezmado para que las señales queden al número de muestras que seleccionó el usuario. A estas señales diezmadas son a las que se les realiza el procesamiento. El propósito de realizar el proceso de sobre muestreo, filtrado y diezmado es para evitar la contaminación por armónicos de señales no deseadas, como por ejemplo, los 60 Hz de las líneas eléctricas, motores, lámparas, etc., para esto se muestrea a una frecuencia más arriba de las señales no deseadas para adquirir estas y evitar el fenómeno por submuestreo de traslape (aliasing), el cual tiene armónicos que se encuentran dentro de la banda de interés. Se aplica el filtro digital que elimina las frecuencias no deseadas y se diezman los datos para obtener sólo las frecuencias de interés.

En la figura 31, se muestra el programa donde se hace la comparación de las señales con la aplicación de sobre muestreo, filtros de fase cero y diezmado de los datos. En un primer paso, se incrementa el muestreo de la señal de entrada 10 veces, se filtra, se hace un diezmado de los datos para que estos queden a la frecuencia determinada por el usuario inicialmente y finalmente se obtiene su espectro. Por otro lado, y con el fin único de comparación se calcula también el espectro de la señal pero esta sin pasar por el proceso de filtrado. Al comparar las señales, se observa que se eliminan las frecuencias no deseadas como se muestra en la figura 32.

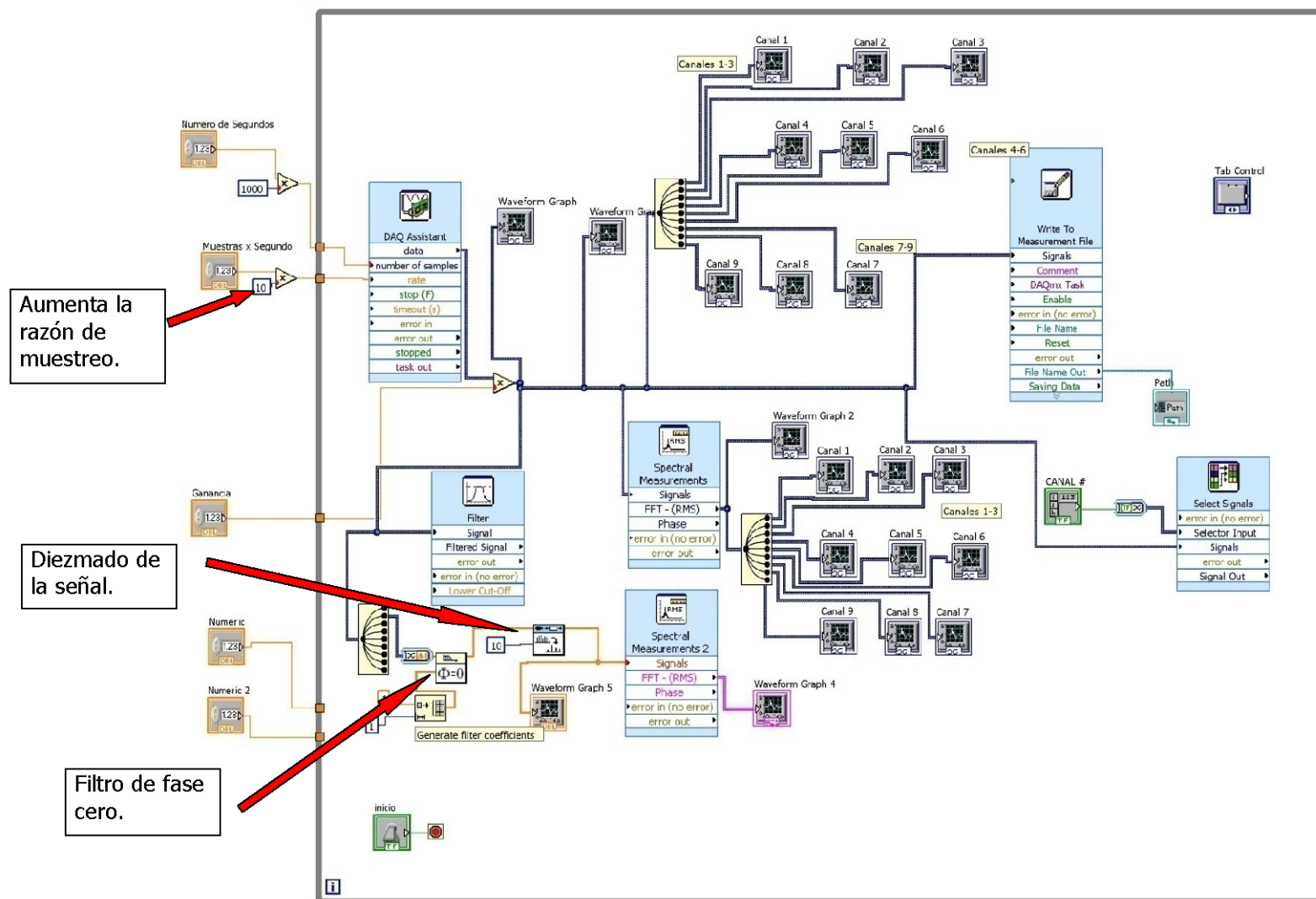


Figura 31. Programa donde se incrementa muestreo, se filtra y diezma la señal.

En la figura 32 se observa el ejercicio de sobre muestrear, filtrar y diezmar, se aplica una frecuencia en 120 Hz a una razón de muestreo dada por el usuario de 100 muestras por segundo. Donde la frecuencia máxima a medir sería de 50 Hz, pero el sistema internamente sobre muestrea 10 veces más para medir hasta 500 Hz, filtra arriba de 50 Hz y diezma los datos para que queden a las 100 muestras por segundo definidas por el usuario. En la parte superior derecha de la figura 32 se muestra el espectro de Fourier de la señal sin filtrar y en la inferior derecha el espectro filtrado a 50 Hz.

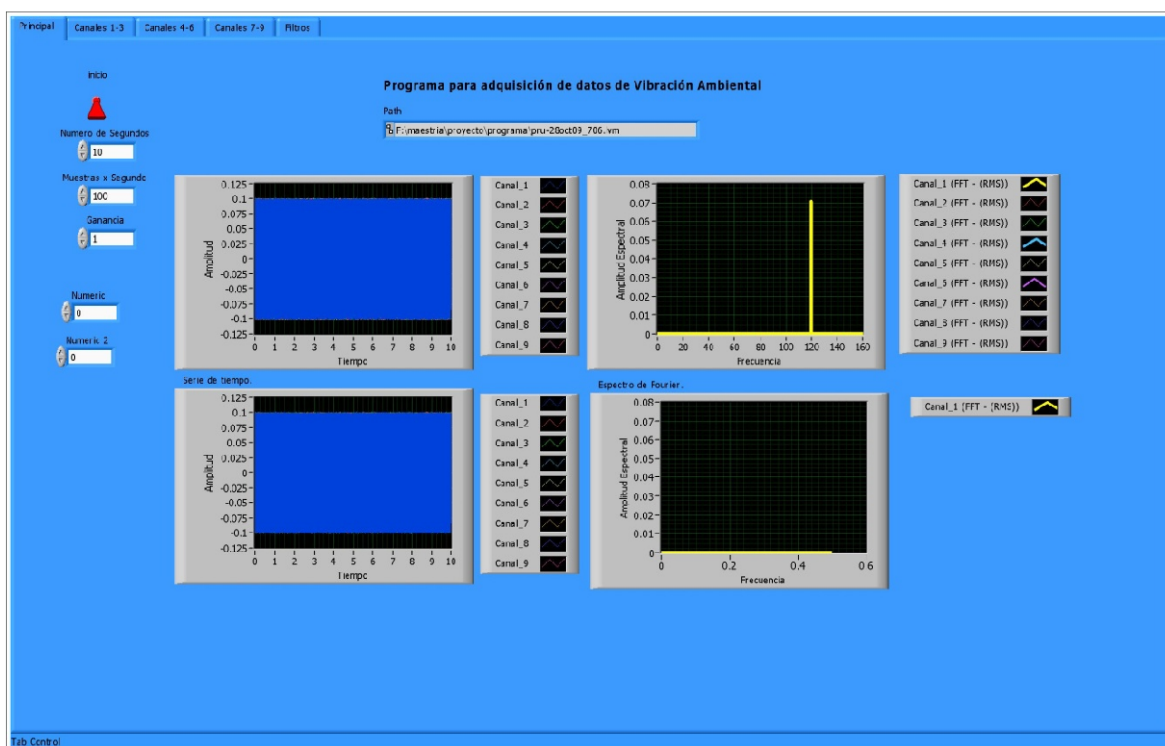


Figura 32. Señales sobre muestreadas, filtradas y diezgadas.

3.4.2.5. Procedimiento 5

En este procedimiento se programó para cada canal de datos un filtro de fase cero y el diezmado correspondiente. Al filtrar los datos se pierde el incremento en tiempo de muestra a muestra, estos quedan como número de muestra, por lo que se realizó el cálculo al considerar el tiempo de adquisición y la razón de muestreo para: los incrementos en tiempo y en frecuencia. Con lo anterior, los ejes de tiempo y frecuencia en las gráficas se presentan con sus respectivos incrementos, y no como número de muestra, sin embargo, en los archivos grabados, se tiene todavía el problema de tener la columna del tiempo en número de muestra, en lugar de incrementos de tiempo.

En la figura 33 se muestra la prueba con una frecuencia de 120 Hz a la cual se le aplicó sobre muestreo, filtrado y diezmado en los nueve canales, observándose en las partes superior e inferior derecha la corrección de los incrementos en los ejes de tiempo y de frecuencia respectivamente.

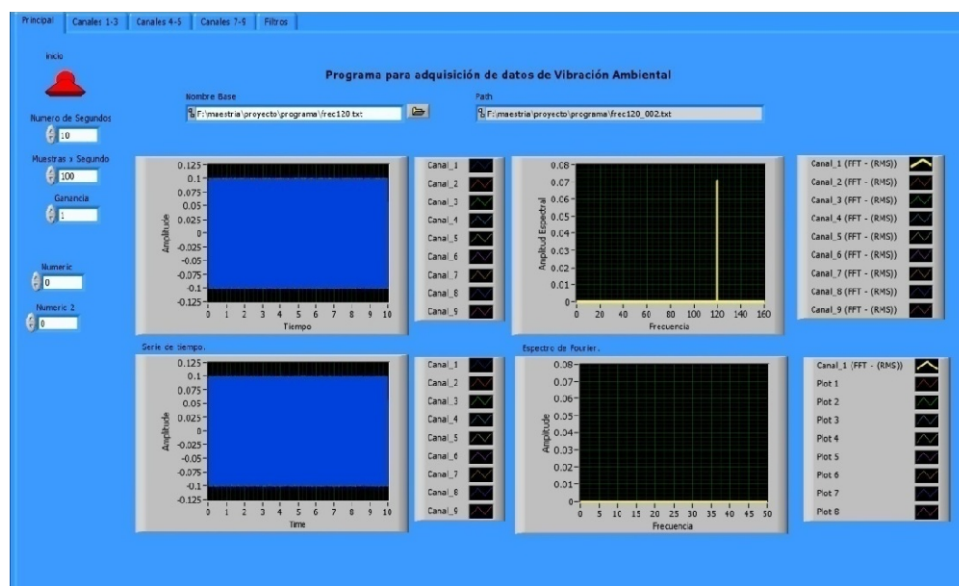


Figura 33. Prueba de eliminación de frecuencias no deseadas y sus armónicos.

El programa de la figura 34 muestra las etapas de filtrado y diezmado de los datos por cada canal, así mismo se muestra el cálculo de los incrementos de tiempo (dt) y de frecuencia (dw).

3.4.2.6. Procedimiento 6

En esta etapa del desarrollo del programa se incluyen más controles con el fin de hacer más flexible el instrumento al usuario y tener mejores prestaciones, entre estos controles se encuentran: interruptor de activación de canales a utilizar y tipo de sensor conectado por canal. Así mismo se agregó una nueva carátula para la comparación de los canales en función del tiempo y el cálculo estadístico para cada canal como lo es la media, valores máximo y mínimo, y la amplitud pico a pico de la señal muestreada. Por otra parte, se corrigió la columna de tiempo en los archivos, indicando el incremento de tiempo para cada muestra.

Los interruptores para seleccionar los canales a utilizar en la medición se muestran en la figura 35 que es una sección de la caratula principal. Estos interruptores se activan dando un click con el ratón sobre el interruptor, el interruptor cambia los colores verde y rojo, donde el verde indica canal activo y el rojo canal inactivo.



Figura 35. Interruptores para la selección de canales a utilizar en la medición.

La selección del tipo de sensor que utilizará cada canal, se hace a través de la selección de un número entre uno y el seis de acuerdo a la tabla de sensores

disponibles actualmente en el LISAI, los cuales son mostrados en la figura 36 que es una sección de la carátula principal.



Figura 36. Selección del tipo de sensor por canal.

Al seleccionar el sensor de cada canal, el programa hace una corrección de la señal medida por el instrumento debido a que cada sensor tiene una constante de motor diferente como se muestra en la tabla 1 (ver página 29). Al hacer la corrección las amplitudes de la señal quedan en unidades físicas, $\gamma(t)$ en cm/s para señales de velocidad y cm/s^2 para señales en aceleración. La ecuación 18 muestra la operación que se aplica a los datos adquiridos. A la señal corregida se le aplica la transformada rápida de Fourier.

$$\gamma(t) = \frac{x(t)}{G} \cdot E \quad (18)$$

Donde:

$\gamma(t)$ = Movimiento de la masa del sensor en unidades físicas, cm/s para velocidad y cm/s^2 para aceleración.

$x(t)$ = Amplitud amplificada del movimiento (volts).

G = Ganancia aplicada a los datos.

E = Constante electrodinámica del sensor, V/cm/s para velocidad y V/cm/s^2 para aceleración.

En la figura 37 se muestra la carátula principal con los controles para selección de canales a utilizar, el tipo de sensor por canal y los sensores programados en el sistema.

En la figura 38 se muestra la carátula de despliegue de las series en función del tiempo con el fin de que el usuario pueda hacer una comparación de las mismas. Antes de adquirir la muestra se deberá seleccionar los canales deseados por medio de los botones digitales, como se describió en la pagina 89. Esta comparación permite, por ejemplo, la comparación de las amplitudes de dos canales horizontales instalados en diferentes sitios de una estructura.

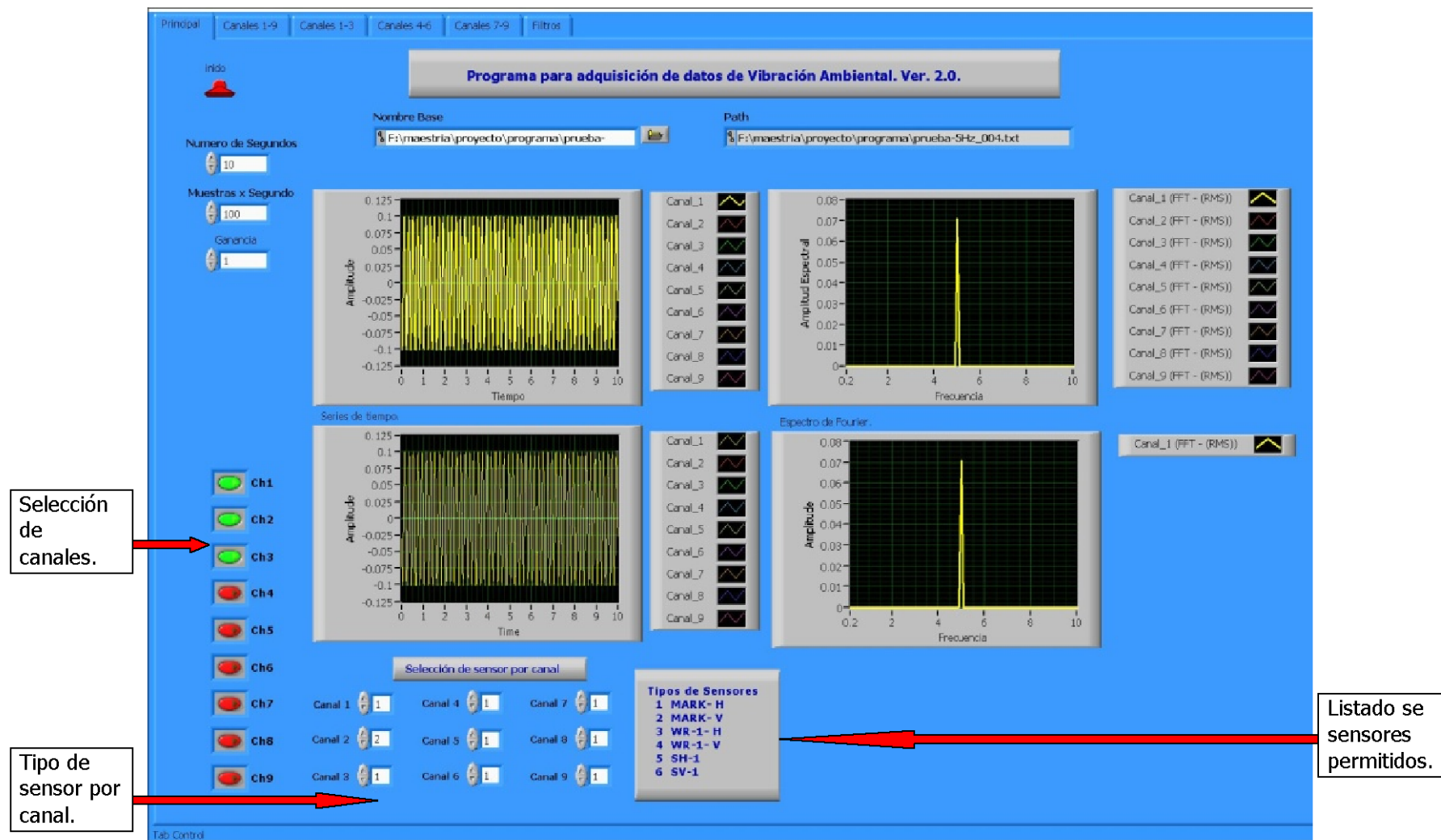


Figura 37. Carátula con controles de selección de canal y tipo de sensor por canal.

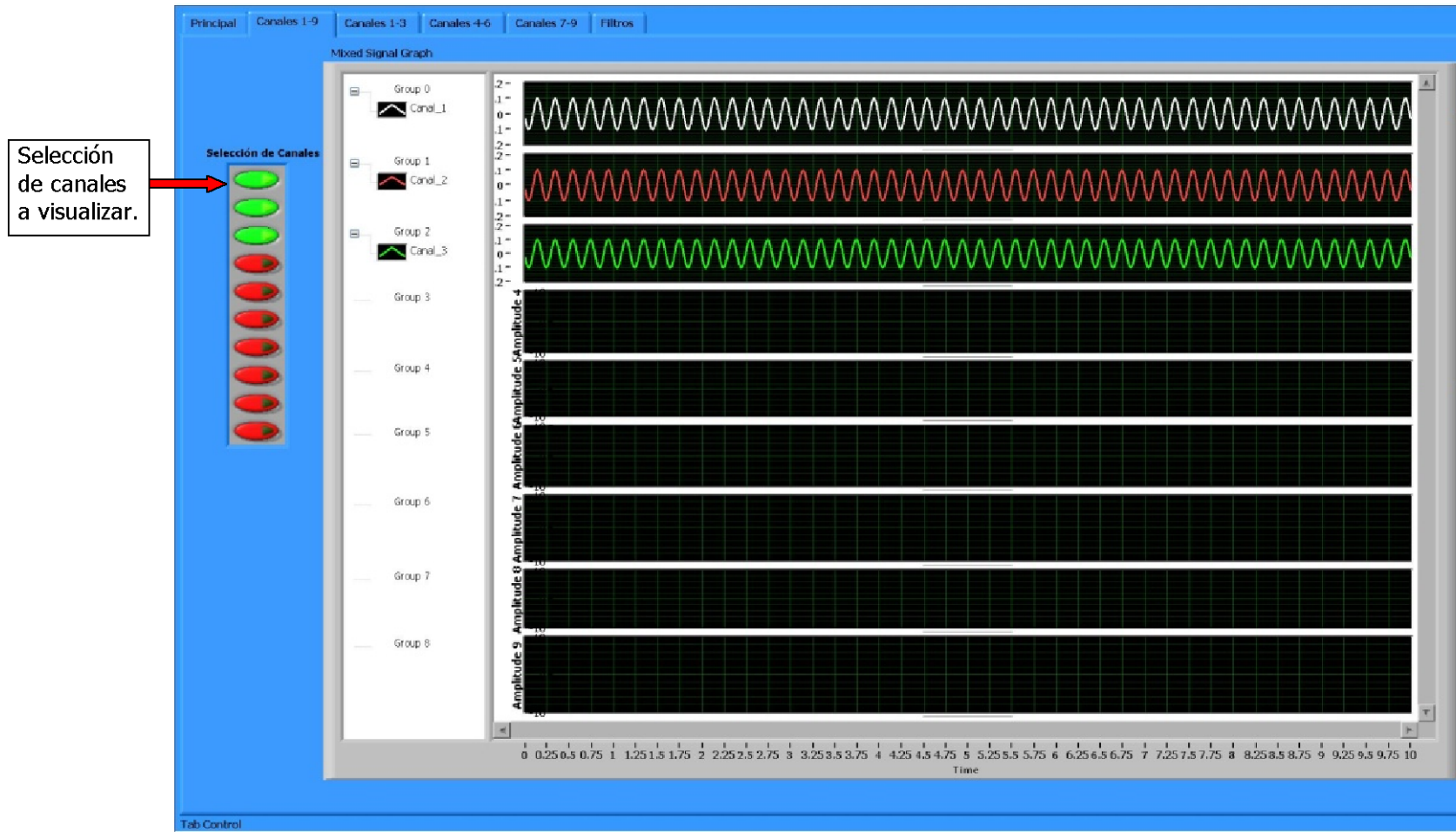


Figura 38. Selección de señales adquiridas en función del tiempo.

Como se mencionó anteriormente, otra funcionalidad que se le agregó al instrumento fue el cálculo de la estadística por canal en el dominio del tiempo, los valores estadísticos que se calculan son: la media, los picos máximo y mínimo, así como amplitud pico a pico. Estos datos son importantes al hacer las mediciones ya que la media indica desnivel del sensor, los máximos y la amplitud pico a pico permiten conocer que ganancia puede aplicarse, dependiendo del rango dinámico. Los máximos también indican el pico máximo de la magnitud que se mide, y se convierte el voltaje indicado a velocidad o aceleración según sea el caso.

La figura 39 muestra las estadísticas calculadas para los canales 1,2 y 3, en esta figura se puede observar las estadísticas por canal, para una frecuencia aplicada de 5 Hz con amplitud de 200 mV_{pp}. En la figura 40 se hace un acercamiento donde se muestra la estadística correspondiente al canal 1.

Datos por Canal:
Media,
Máximo,
Mínimo,
Amp p-p.

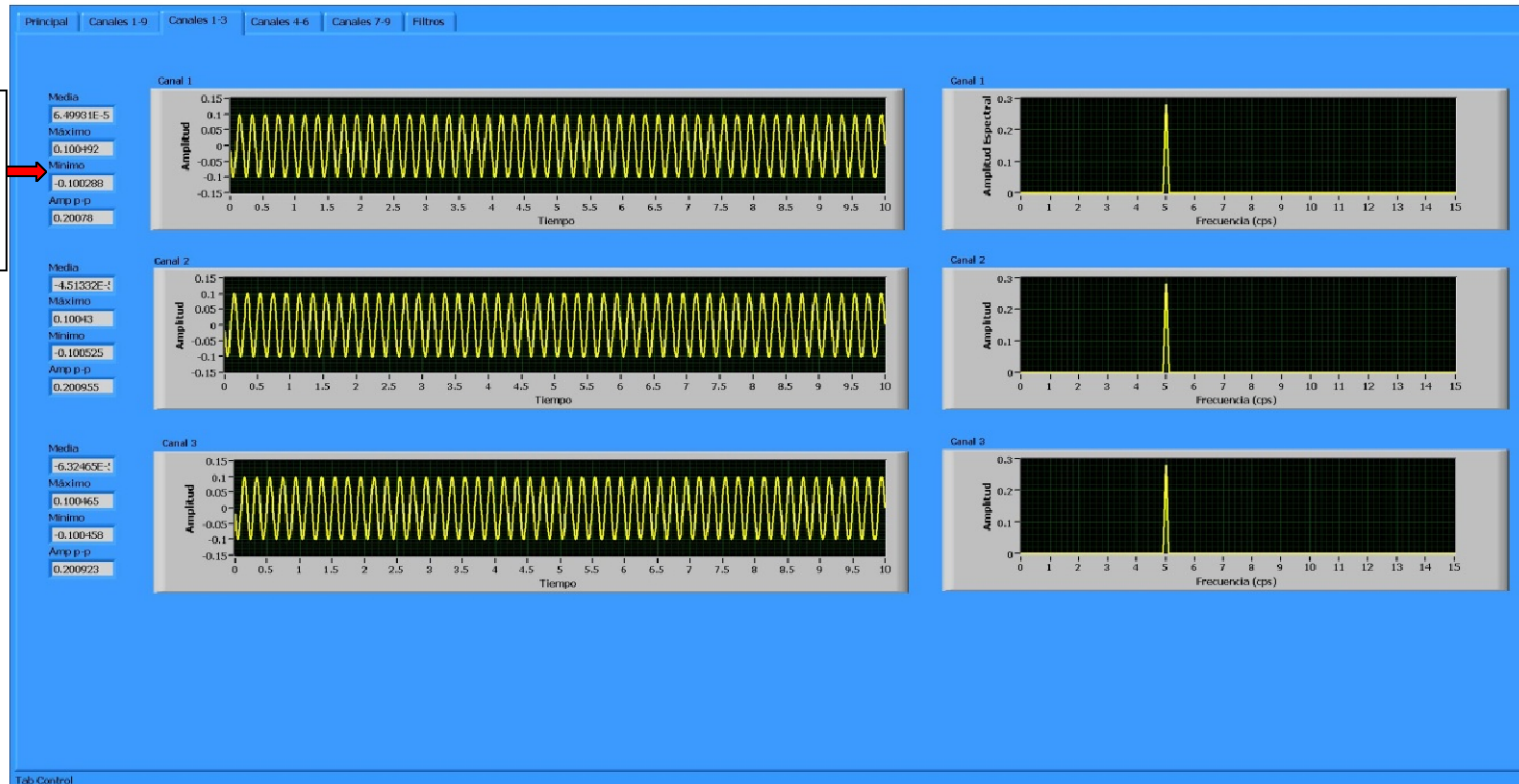


Figura 39. Carátula de los canales 1, 2, 3, con estadística por canal.

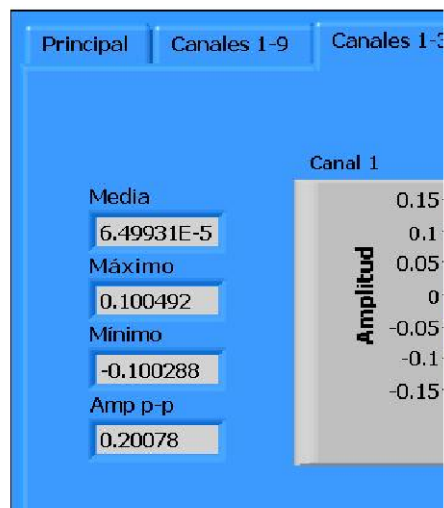


Figura 40. Estadísticas por canal.

En la figura 41 se muestra del programa donde se incorporan las nuevas características y mejoras descritas en este procedimiento, como son: activación de canal, tipo de sensor por canal, listado de sensores permitidos, corrección por constante de motor, carátula de comparación de canales, estadísticas por canal, y corrección de la columna de tiempo en los archivos grabados.

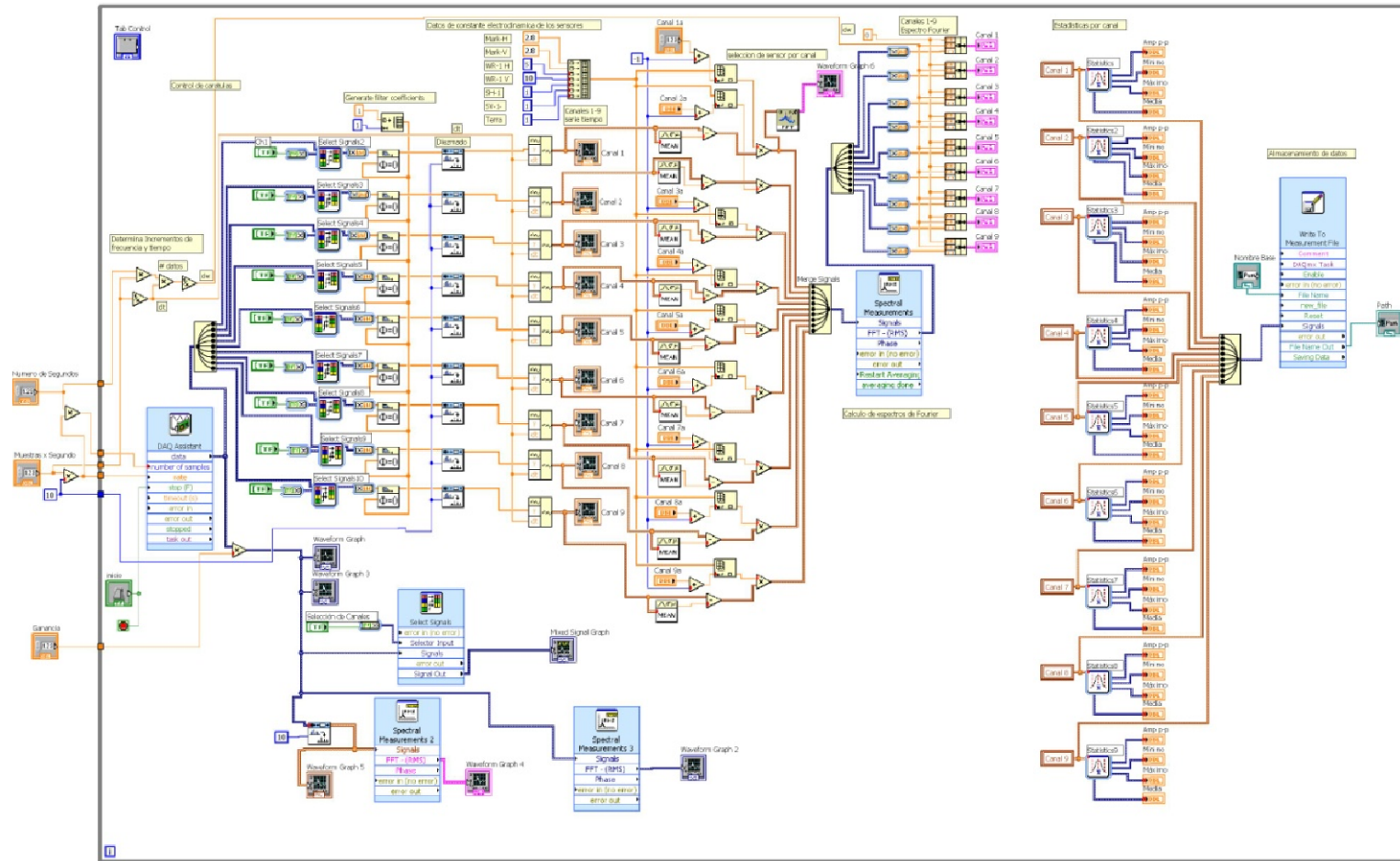


Figura 41. Programa que incluye tipos de sensor, corrección por instrumento, estadísticas, comparación de canales.

3.4.2.7. Procedimiento 7

En este procedimiento se llevaron a cabo tres puntos muy importantes para el proyecto que son: aplicación de ganancia, control de frecuencia de corte del filtro digital de fase cero y prueba de un filtro RC pasa bajos de primer orden colocado antes de la adquisición de los datos para filtrar señales no deseadas.

En la figura 42 se muestra la nueva carátula principal donde se reacomodan los controles y se eliminan dos gráficas que fueron utilizadas para prueba, sólo quedan dos para ver las series de tiempo y espectros de Fourier de los nueve canales, además se añaden los controles de ganancia y frecuencia de corte del filtro pasa bajas.



Figura 42. Carátula principal con control de ganancia y frecuencias de corte de filtro digital.

En la figura 43 se muestra una sección de la carátula principal donde se muestran los controles de ganancia y frecuencia de corte del filtro digital de fase cero. El filtro digital es de orden 10 y tiene un rango de frecuencias de corte de 5 a 100 Hz en incrementos de 1 Hz, teniéndose una frecuencia predeterminada de 20 Hz.

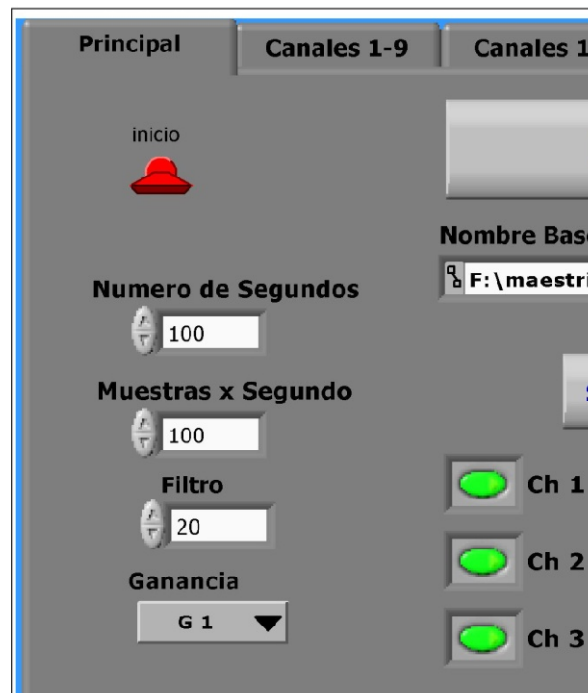


Figura 43. Controles de ganancia y frecuencia de corte de filtro digital.

Se programaron 10 ganancias que se muestran en la tabla 7. Puesto que el control del módulo de adquisición no tiene opción para manipular la ganancia directamente, ya que este se configura a una ganancia predeterminada, se realizó una configuración de 10 casos posibles de configuración, donde en cada caso se programó un control del módulo con diferente ganancia, se logró con esto tener 10 ganancias posibles. Hasta este punto las ganancias se aplican por igual a los nueve canales. La ganancia predeterminada es de 1.

Al aplicarle ganancia a las señales antes de ser muestreadas, tiene que removerse esta antes de calcular su espectro de acuerdo a la ecuación 18 (ver página 70).

Tabla 7. Ganancias configuradas.

Caso:	Ganancia:
1	1
2	2
3	5
4	10
5	20
6	50
7	100
8	200
9	500
10	1000

En la figura 44 se muestra el menú de ganancias, al dar un click sobre la ganancia actual se despliegan las opciones posibles de ganancias y el usuario puede seleccionar la ganancia requerida.

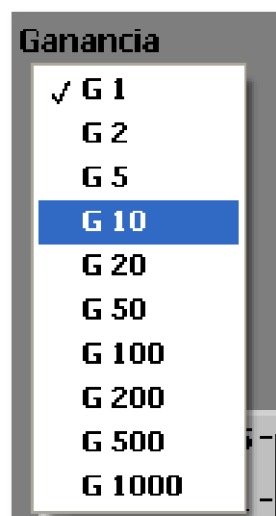


Figura 44. Vista del menú de ganancias posibles.

El programa con estos nuevos controles de aplicación de frecuencia de corte del filtro, de ganancia y remoción de la misma se muestra en la figura 45.

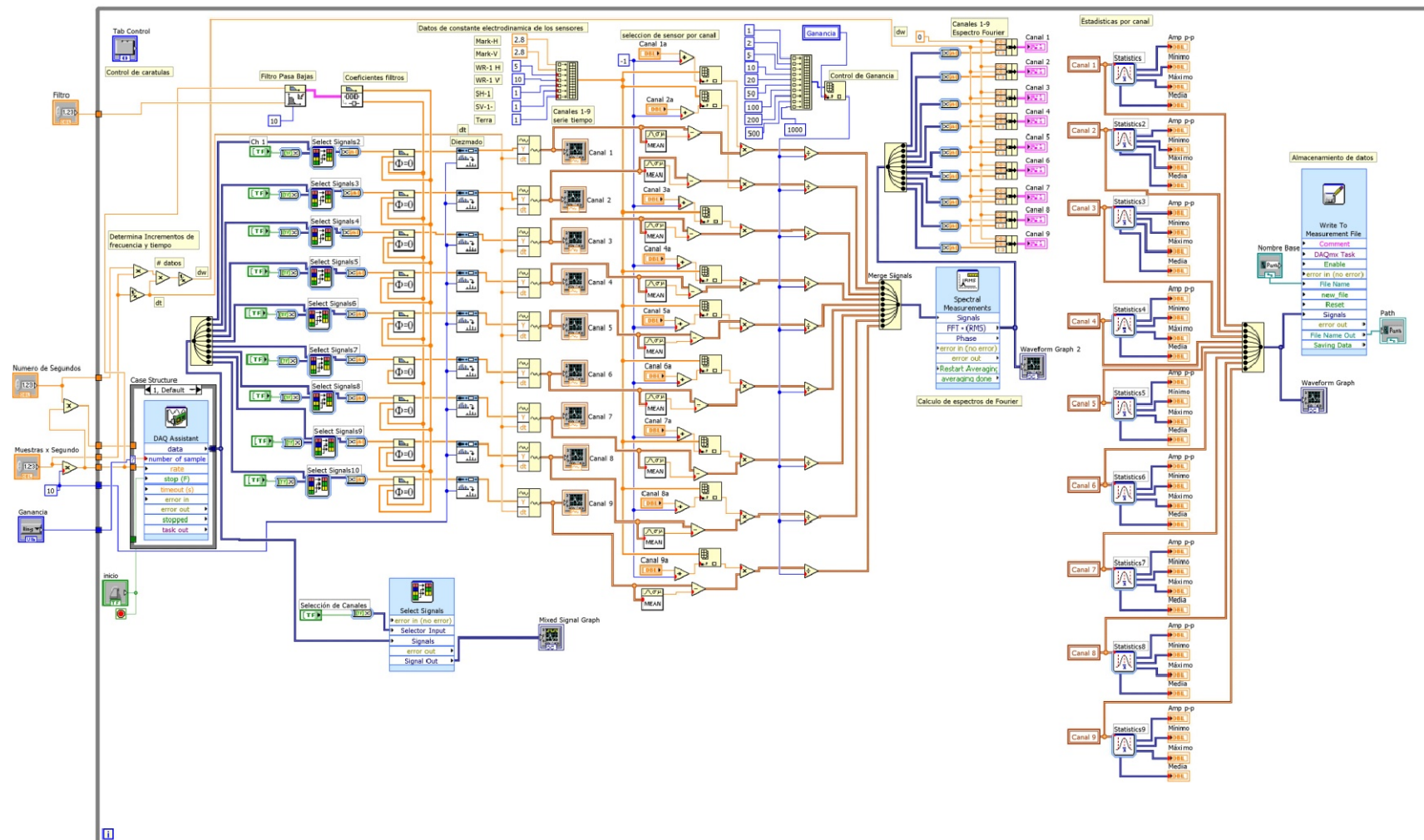


Figura 45. Programa con ganancia y frecuencias de corte.

Filtro RC de primer orden anti-alias

En conjunto con el control de frecuencias de corte del filtro digital, se hicieron unas pruebas de ruido con un sensor Mark-L4 horizontal donde se observó que la señal muestreada tenía gran cantidad de ruido, por lo que se implemento un filtro RC de primer orden, con una frecuencia de corte de 159 Hz, para mantener la menor atenuación de la amplitud en el rango de 0 a 100 Hz. Realizándose otra prueba cuya señal se adquirió en tres canales con diferentes condiciones.

El lugar de la prueba es en edificio donde se encuentra el LISAI y se tiene que la frecuencia del sitio es 5 Hz en el eje horizontal, dato corroborado con otros equipos y estudios internos del sitio.

En el canal 1 mostrado en la figura 46 no se utilizó filtro anti alias y tampoco filtro digital. Se puede observar que el eje de frecuencia está hasta 500 Hz, esto es debido a que la señal está sobre muestreada y no se pasó por la etapas de filtrado digital y diezmado. Como se observa en el espectro hay un gran contenido de ruido y no se aprecian los 5 Hz esperados.

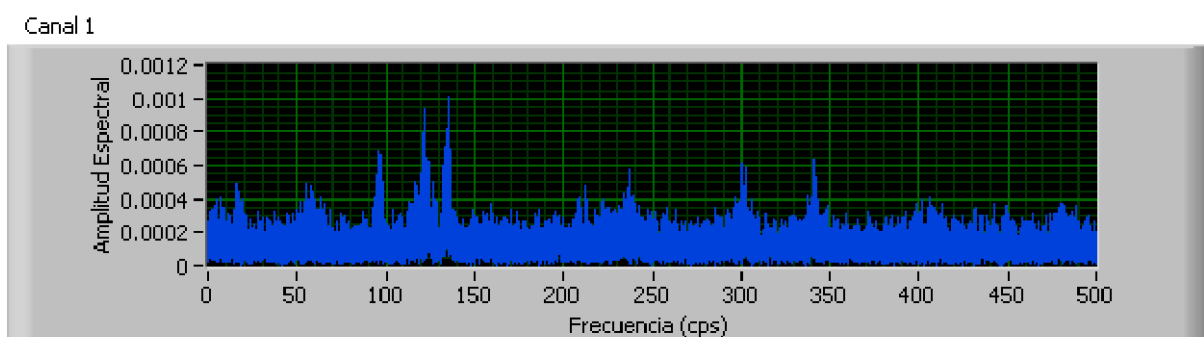


Figura 46. Canal 1, sin filtros anti-alias y digital, sobre muestreado.

En el canal 2 mostrado en la figura 47, se aplica filtro anti-alias pero no el digital, la señal sigue sobre muestreada. En esta figura se observa en el espectro que una

gran cantidad de ruido es filtrado, lo que permite observar la frecuencia fundamental del sitio en 5 Hz.

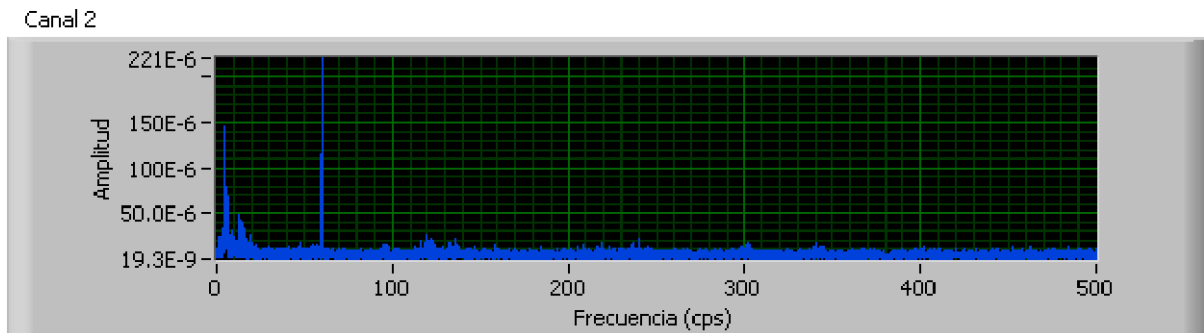


Figura 47. Canal 2, filtro anti-alias, pero no digital, sobre muestreada.

En el canal 3, que se muestra en la figura 48, se aplican los filtros anti-alias y digital a 20 Hz, y se diezma la señal. Como se aprecia en el espectro, la frecuencia del sitio es de 5 Hz, la cual estaba oculta en el ruido que se muestra en la figura 46, además que al estar diezclado la frecuencia máxima es de 50 Hz.

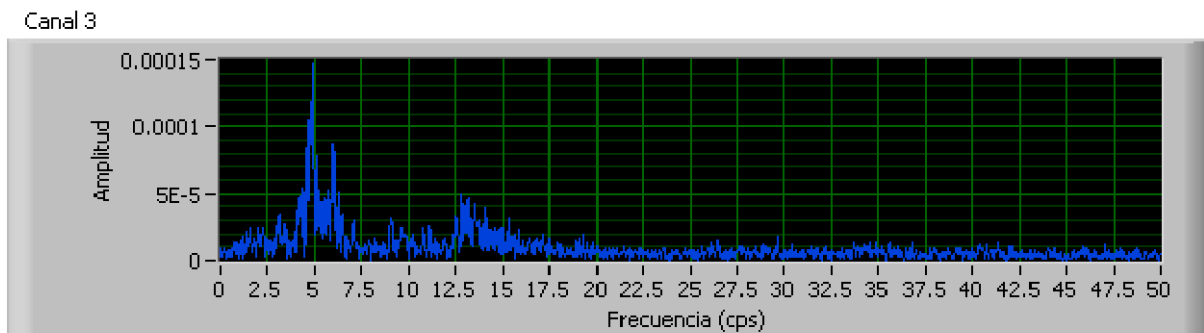


Figura 48. Canal 3, aplicación de filtros anti-alias, digital y diezclado de los datos.

3.4.2.8. Procedimiento 8

En la mayoría de los análisis de datos sísmicos sólo se requiere analizar la amplitud y frecuencia, sin embargo, hay casos en los cuales se requiere analizar también la

fase, como por ejemplo el análisis de los modos de vibrar de una estructura. Es en estos casos donde es importante seleccionar apropiadamente los tipos de filtros a utilizar.

Los filtros Butterworth tienen una respuesta en amplitud plana en la banda de interés, pero su respuesta en fase no es lineal, por lo que adelantan o atrasan la señal, lo que produce una distorsión de los datos. En cambio, los filtros Bessel tienen una respuesta en fase lineal, pero su respuesta en la amplitud es pobre. La figura 49 ilustra lo anteriormente expresado para filtro de octavo orden, con una frecuencia de corte en 400 Hz. Los datos para graficar estas curvas de los filtros se procesaron con un programa de la compañía MAXIM, la cual diseña filtros digitales [18].

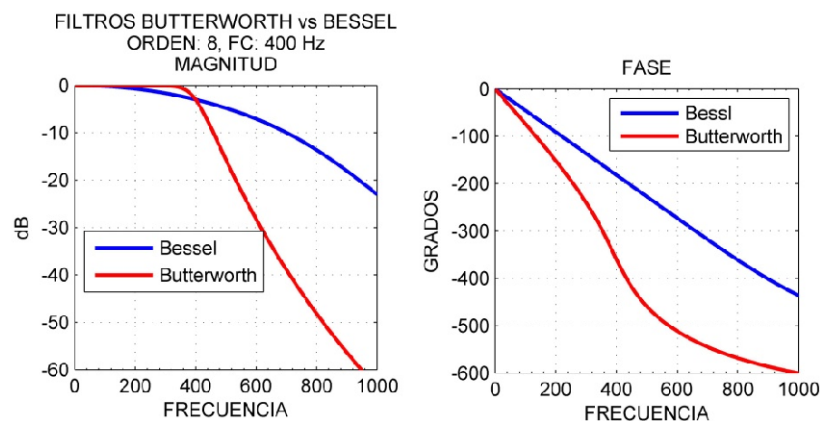


Figura 49. Respuesta en magnitud y fase de filtros Bessel vs Butterworth.

Filtros pasa bajas tipo Bessel

Se analizan las respuestas en magnitud y fase de los filtros Bessel de la figura 50, se determinó utilizar un filtro de este tipo, con frecuencia de corte a 158 Hz y de

octavo orden. En esta figura se ilustran varios filtros de orden 8 y 16, a frecuencias de corte de 400, 600, 800 y 1000 Hz.

Al hacer un acercamiento de la banda de interés, 0 – 10 Hz, figura 50 c), se observa que la respuesta en amplitud de los filtros analizados tienen una caída menor a - 0.1 dB, lo que se considera una respuesta plana y aceptable. También se observa en la figura 50 d), que su fase es completamente lineal.

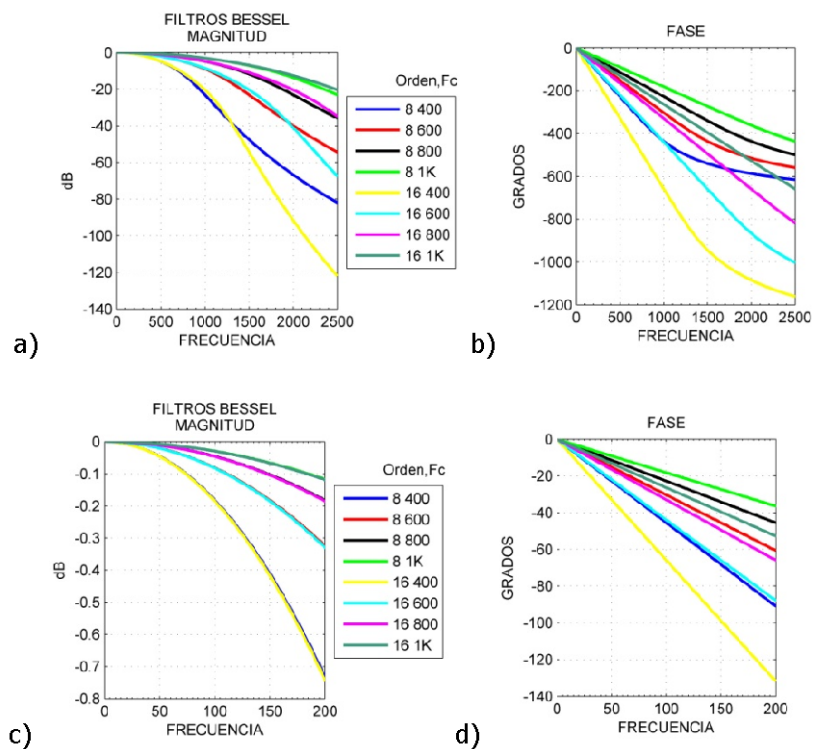


Figura 50. Respuestas en amplitud y fase de filtros Bessel.

En la figura 51 se muestra las respuestas en amplitud y fase de un filtro Bessel de octavo orden con frecuencia de corte de 158 Hz. La atenuación en la banda de 0 a 10 Hz es 0.012 dB, hasta 100 Hz es de - 1.18 dB como se muestra en la figura 51 c), y su fase es lineal. Mientras que una atenuación de - 60 dB se da hasta los 716 Hz. Para evitar contaminación en la banda de 0 a 100 Hz por armónicos de las frecuencias entre 101 y 1000 Hz se muestreará a 2000 muestras por segundo. En

el procesamiento se utiliza un filtro digital para eliminar estas frecuencias y se diezman los datos para estos queden a las muestras indicadas por el usuario.

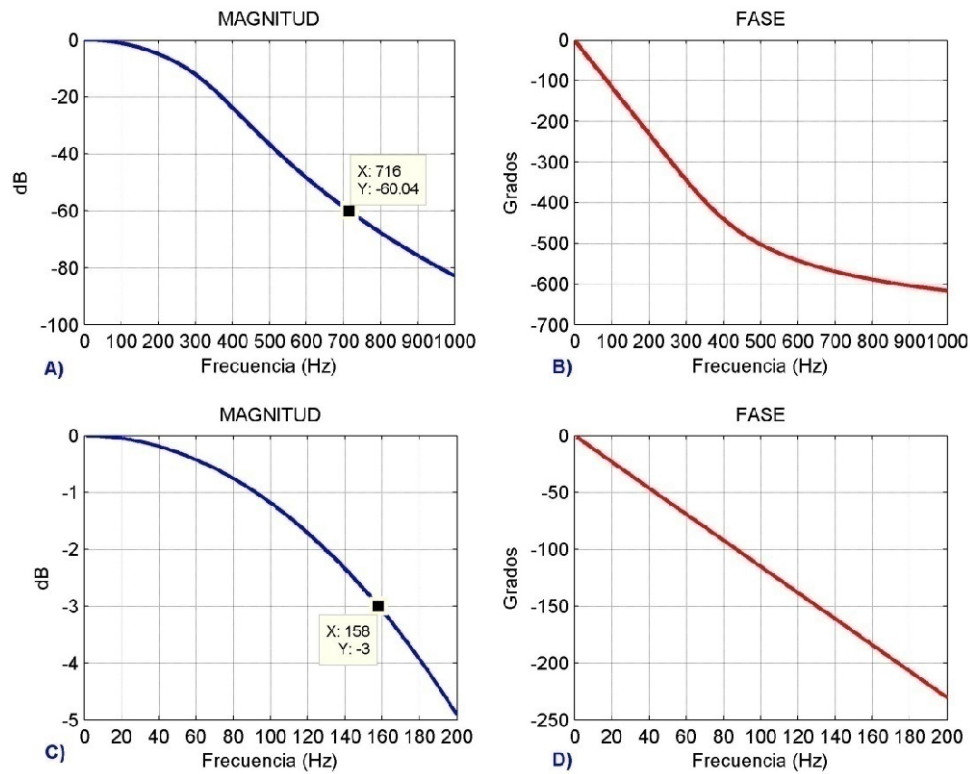


Figura 51. Respuesta en magnitud y fase de filtro Bessel de orden 8, $F_c = 158$ Hz.

La tabla 8 muestra el comportamiento del filtro Bessel en amplitud y fase.

Tabla 8. Características de filtro Bessel de octavo orden y $f_c = 158$ Hz.

Freq (Hz):	Amp (dB):	Fase (deg):	Retardo (seg):
1.000	-0.000	-1.151	3.19752E-03
10.000	-0.012	-11.511	3.19752E-03
20.000	-0.047	-23.022	3.19752E-03
30.000	-0.105	-34.533	3.19752E-03
40.000	-0.187	-46.044	3.19752E-03
50.000	-0.293	-57.555	3.19752E-03
60.000	-0.422	-69.066	3.19752E-03
70.000	-0.576	-80.577	3.19752E-03
80.000	-0.753	-92.089	3.19752E-03
90.000	-0.955	-103.600	3.19752E-03
100.000	-1.181	-115.111	3.19752E-03
120.000	-1.709	-138.133	3.19752E-03
140.000	-2.340	-161.155	3.19751E-03
150.000	-2.696	-172.666	3.19750E-03
158.000	-3.000	-181.875	3.19748E-03
180.000	-3.930	-207.198	3.19725E-03
200.000	-4.902	-230.216	3.19636E-03
300.000	-12.041	-343.960	3.05001E-03
315.000	-13.519	-360.220	2.96839E-03
400.000	-23.648	-439.891	2.18088E-03
500.000	-36.564	-502.191	1.35229E-03
600.000	-48.272	-541.806	8.94816E-04
700.000	-58.521	-568.960	6.36171E-04
716.000	-60.040	-572.535	6.05587E-04
800.000	-67.537	-588.780	4.76681E-04
900.000	-75.556	-603.920	3.71163E-04
1000.000	-82.766	-615.883	2.97548E-04

Implementación de los filtros

La implementación de los filtros se realizó con filtros de capacitancias conmutadas de octavo orden del fabricante MAXIM, se utilizó el circuito integrado MAX7401 [19]. Una de las características de estos filtros es que operan con frecuencia de reloj externo o interno, para este proyecto se decidió utilizar el reloj interno, ya

que únicamente es necesario un capacitor externo para su funcionamiento. El valor del capacitor es determinado por la ecuación (19).

$$C_{osc}(pF) = \frac{K \cdot 10^3}{f_{osc}(KHz)} \quad (19)$$

Donde:

C_{osc} = Capacitor del oscilador (pF).

f_{osc} = Frecuencia del oscilador (KHz).

$K = 38$ para MAX7401.

$K = 53$ para MAX7480.

La frecuencia de corte del filtro depende de la frecuencia de reloj en una relación de 100 a 1, por ejemplo, si la frecuencia de reloj es de 50 KHz la frecuencia de corte es de 500 Hz. Con esta característica se puede cambiar la frecuencia de corte con sólo cambiar de valor este capacitor.

Otro modelo de filtro es el MAX7480 [20] tipo Butterworth, también de octavo orden, el cual tiene la misma configuración que el modelo MAX7401 Bessel, con lo cual se puede intercambiar de integrado y el capacitor del oscilador interno para tener otro tipo de filtro sin la necesidad de modificar el circuito.

La figura 52 muestra el diagrama esquemático de los filtros tipo Bessel de octavo orden para los canales 1, 2 y 3. En el conector JP1 entran las señales que provienen de los sensores, mientras que en el conector JP2 salen las señales filtradas hacia el módulo de adquisición. En el conector JP3 entran los voltajes ± 12 Vdc provenientes de la tarjeta de alimentación para los acelerómetros. Para los canales 4, 5, 6 y 7, 8, 9, la configuración de los filtros es la misma.

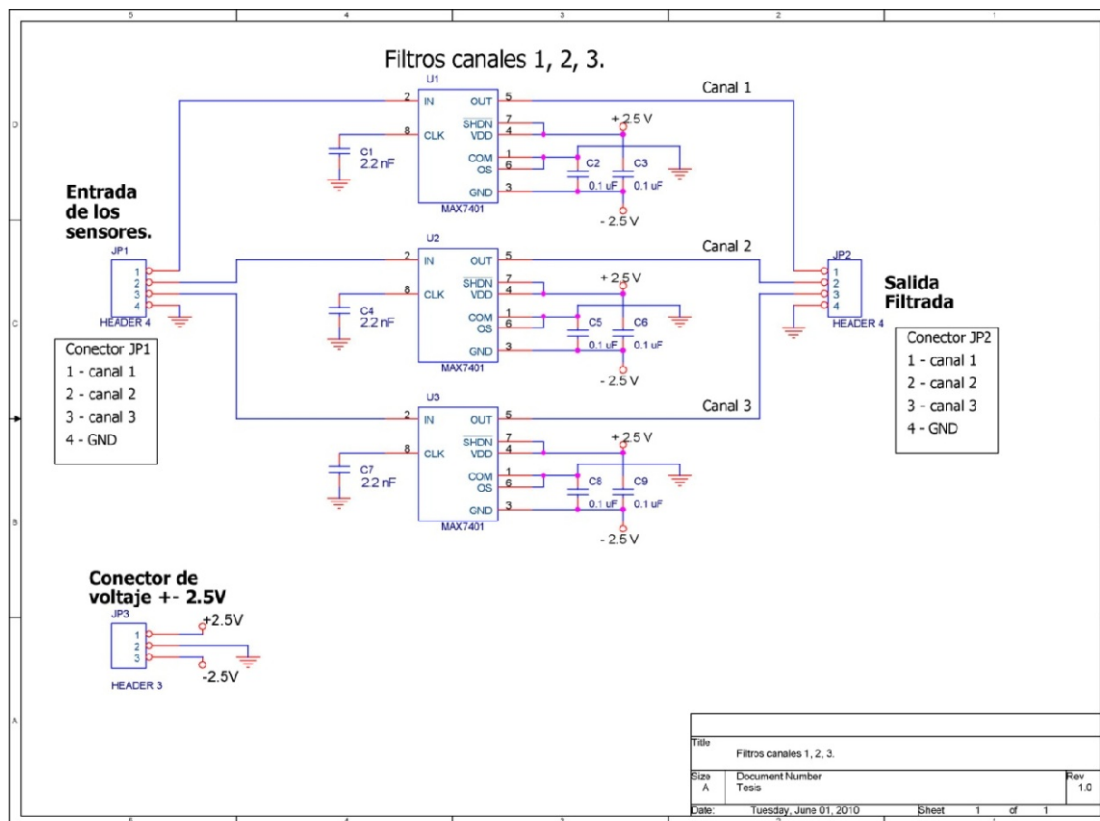


Figura 52. Diagrama de los filtros Bessel de octavo orden para canales 1, 2, 3.

Prueba con un sensor Mark horizontal aplicando excitación ligera

La prueba consiste en comparar la utilización de un filtro Bessel de octavo orden (MAX7401), el filtro digital de decimo orden (Labview) y diezmado de datos. Se tiene un sensor Mark horizontal al cual se le aplicó con la mano pequeñas tensiones en su cable para excitarlo, y cuya salida se muestreó en tres canales con las configuraciones a comparar que se muestran en la tabla 9. La excitación aplicada es para resaltar la señal del sensor sobre el ruido capturado en la misma señal.

Tabla 9. Configuraciones a comparar en una misma señal de datos.

Canal:	Filtro Anti-alias:	Filtro digital:	Diezmado:
Canal 1	✓	x	x
Canal 2	x	x	x
Canal 3	✓	✓	✓

En la figura 53 se muestra el resultado de la prueba en las series tiempo, el canal 1 muestra una señal sin altas frecuencias por la aplicación del filtro Bessel, en cambio en el canal 2 que no tienen ningún acondicionamiento de la señal si se observan altas frecuencias, en el canal 3 se tiene una señal más limpia al aplicarse ambos filtros y diezmado. Como resultado de esta prueba se puede concluir que el aplicar ambos filtros y diezmar la señal, se obtienen señales sin ruido de alta frecuencia y de mayor amplitud que las señales del movimiento del sitio de medición cuando este está sin excitación.

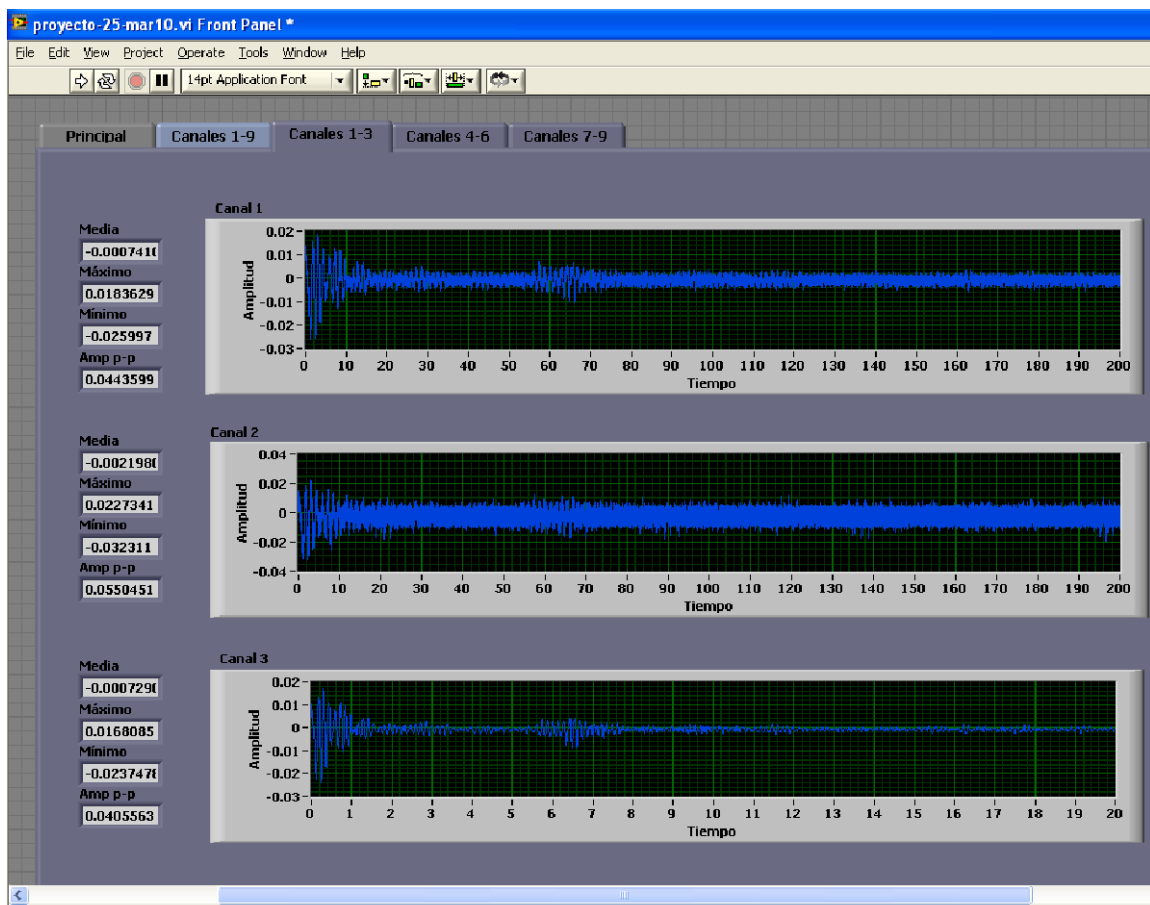


Figura 53. Comparación utilizando filtros y diezmado.

En la figura 54 se muestra el resultado en el dominio de la frecuencia. En canal 1 se tiene un armónico en 49 Hz, mientras que en el canal 2 donde no hay acondicionamiento de la señal se tienen en 20, 22.5, 45 y 49 Hz, el de mayor contribución es el de 45 Hz, en cambio en el canal 3 al aplicarle el filtro digital con frecuencia de corte en 50 Hz disminuyó la amplitud de la frecuencia en 49 Hz. Como se observó en el dominio del tiempo la importancia de la utilización de los filtros, en el dominio de la frecuencia se obtienen en consecuencia espectros de las señales menos contaminadas por frecuencias no deseadas.

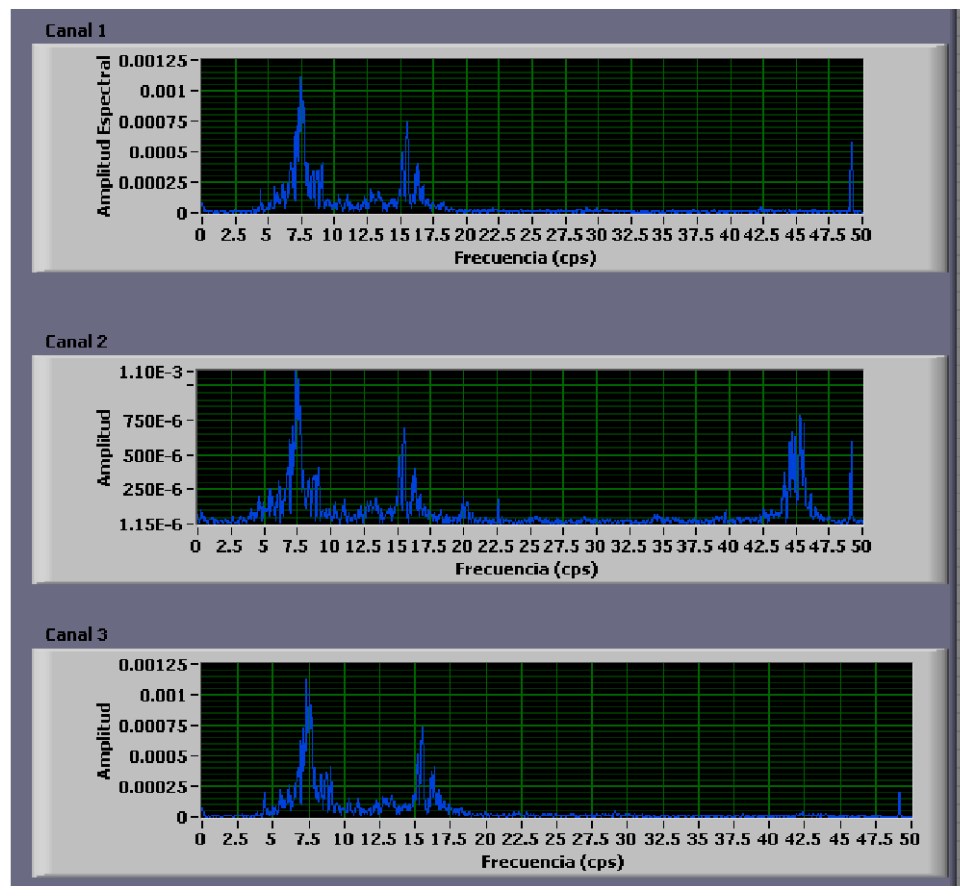


Figura 54. Comparación en el dominio de la frecuencia.

Prueba con vibración ambiental en laboratorio

La prueba se realizó bajo las mismas condiciones de aplicación de filtros y diezmado de la prueba anterior, sólo que en diferente sitio y con vibración ambiental. Como resultado se observa en la figura 55, que el nivel de ruido del canal 2 es 20 veces mayor que la señal del canal 3 a la cual se le aplicó filtros y diezmado, mientras que para el canal 1 que sólo se le aplicó el filtro anti-alias es ocho veces mayor. También se observa una mayor cantidad de frecuencias en la señal del canal 2 respecto a los canales 1 y 3. Confirmándose con esta prueba que

la utilización de filtros anti-alias y digital es la mejor opción para obtener señales con la menor cantidad de ruido no deseado.

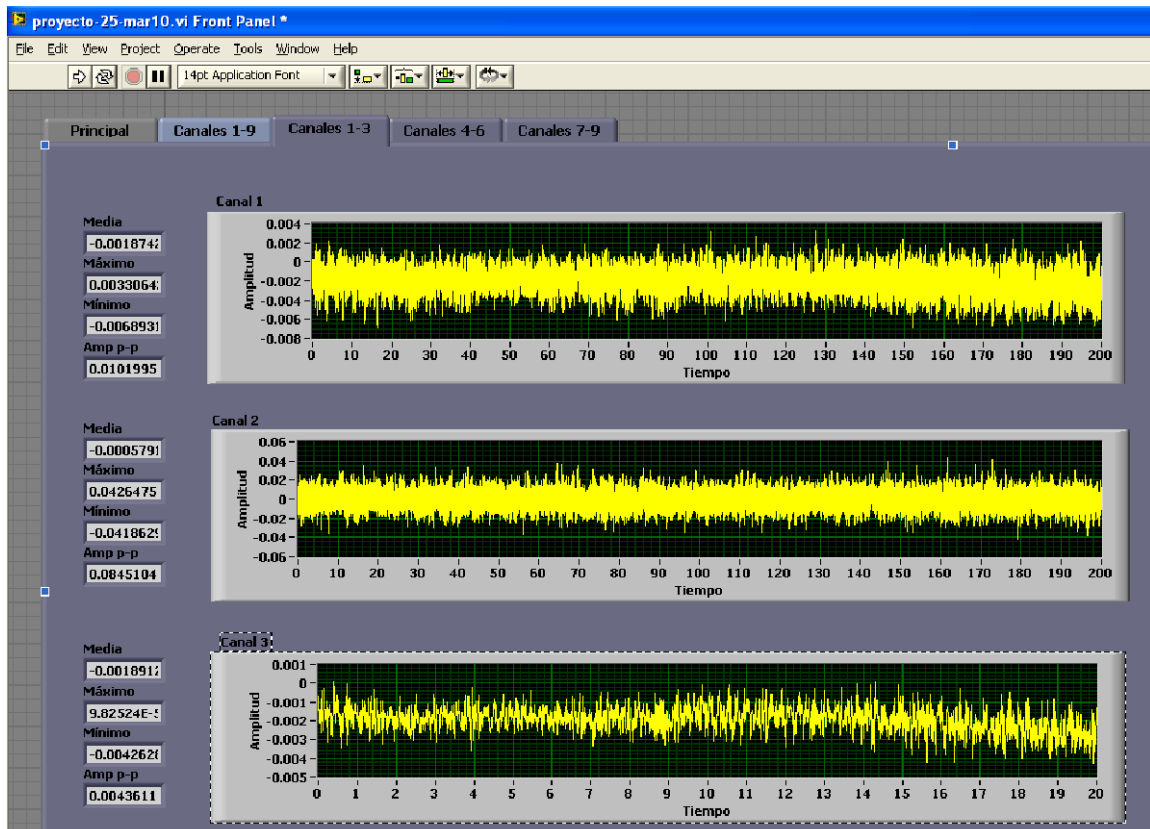


Figura 55. Comparación aplicando filtros en vibración ambiental.

En la figura 56 se muestra la comparación en el dominio de la frecuencia, en esta figura se puede observar en el canal 2 que la frecuencia esperada en 4.5 Hz se pierde en las frecuencias del ruido adquirido, en cambio en los canales 1 y 3, que fueron filtrados la señal se observa claramente. La figura 57 muestra la banda de 0 a 10 Hz de la misma prueba donde se resalta lo descrito anteriormente.

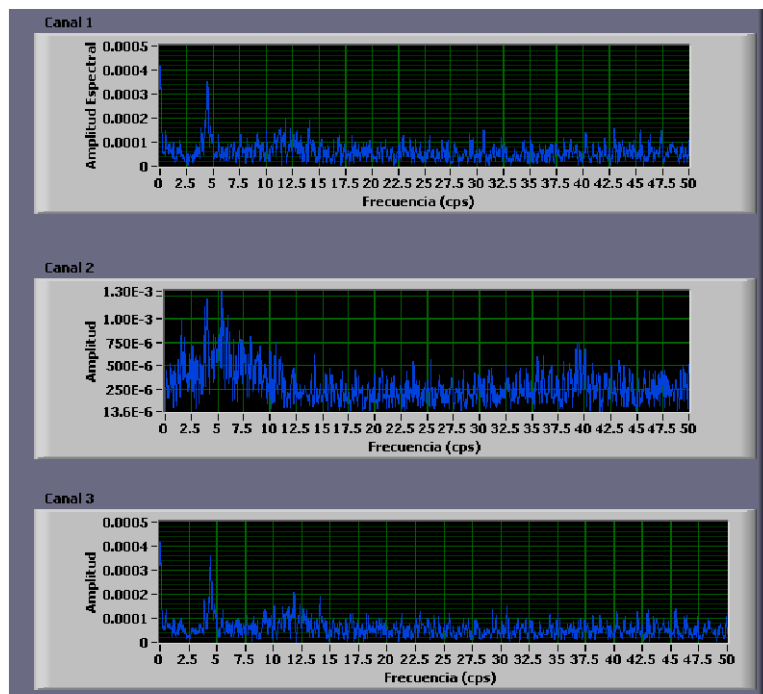


Figura 56. Comparación de espectros en vibración ambiental.

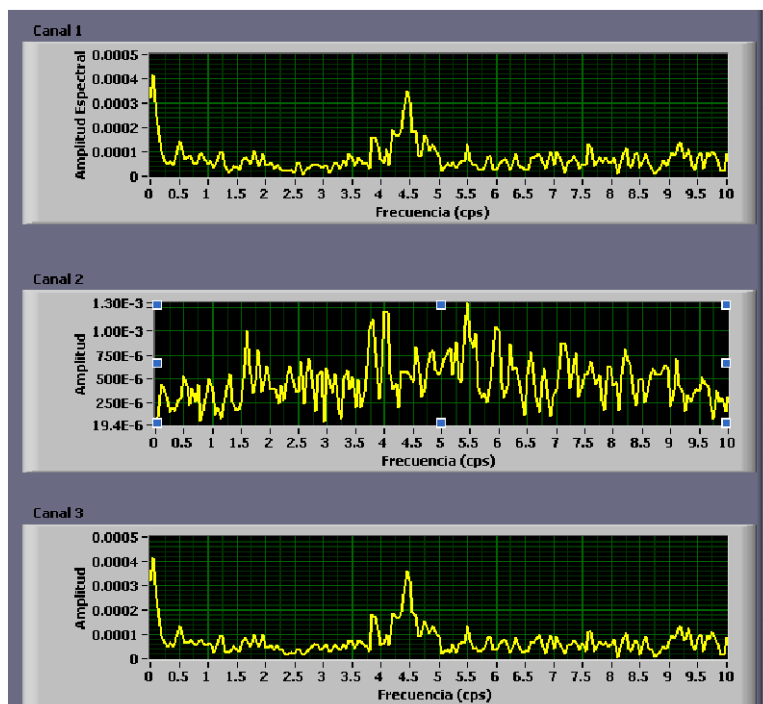


Figura 57. Comparación de espectros en vibración ambiental de 0 a 10 Hz.

Comparación contra SSR-1 en vibración ambiental

Para poder comparar y validar las mediciones con este instrumento se realizó la primera comparación contra otro equipo de medición existente en LISAI, la comparación se realizó con un SSR-1. La prueba consistió en colocar dos sismómetros Mark uno horizontal y otro vertical en el mismo sitio de medición (sobre una mesa), las señales de cada sensor se midieron en forma simultánea en ambos equipos. Se realizó una toma de datos de 20 segundos a 100 muestras por segundo con una ganancia de uno en ambos equipos. Se procesó los datos para el SSR-1 y se compararon los espectros.

El procesamiento de los datos para el SSR-1 se realizó con el paquete del laboratorio para este equipo, graficándose en Matlab. En la figura 58 se muestra la comparación de las series de tiempo del canal horizontal en el SSR-1 y en el módulo. Como no se tiene un control para el inicio simultáneo de los registros de datos en ambos equipos, se tomó la muestra y se alineó manualmente para poder comparar las series de tiempo; en la serie de tiempo del módulo se observa un pequeño offset producto del pequeño desbalance en la polarización de los filtros anti-alias y las características del mismo, pero la forma y las amplitudes de ambas series son muy similares.

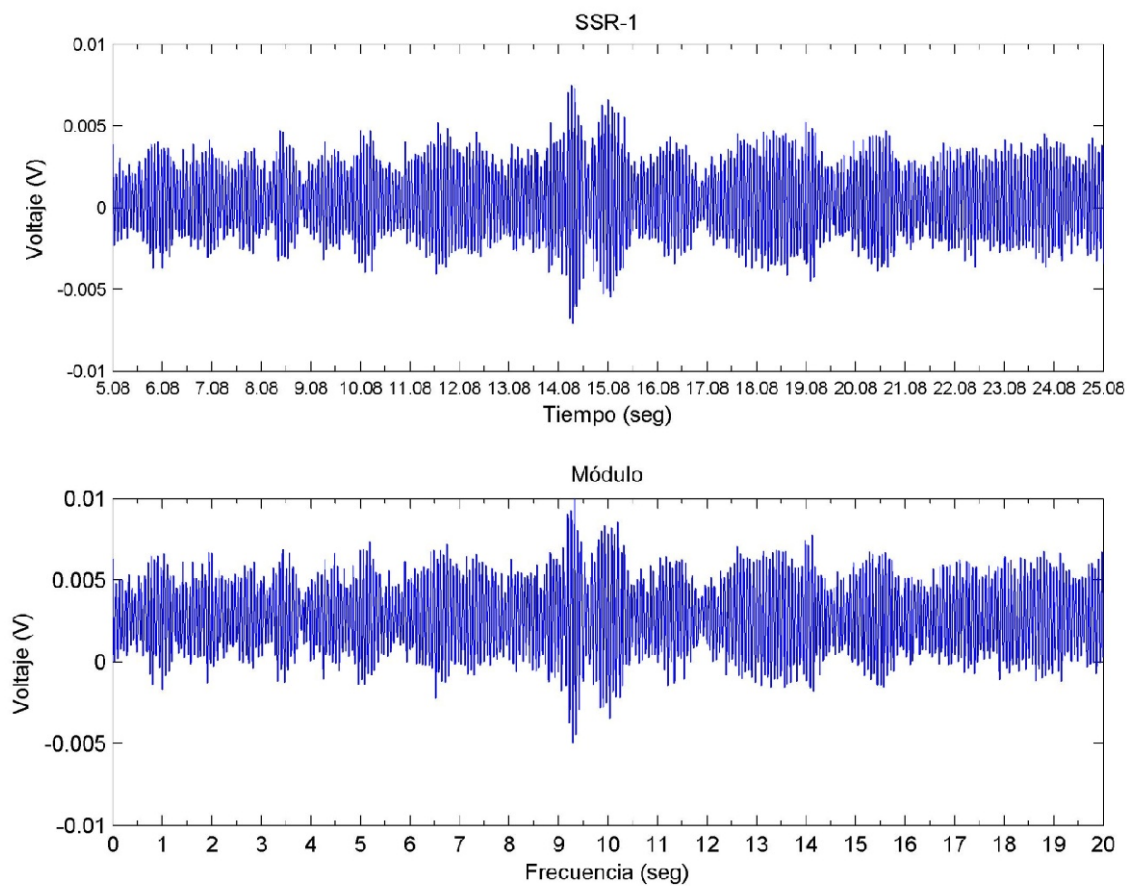


Figura 58. Comparación de series de tiempo horizontales del SSR-1 vs Módulo.

En la figura 59 se muestra la serie de tiempo graficada en el programa Labview del módulo, observándose el mismo offset.

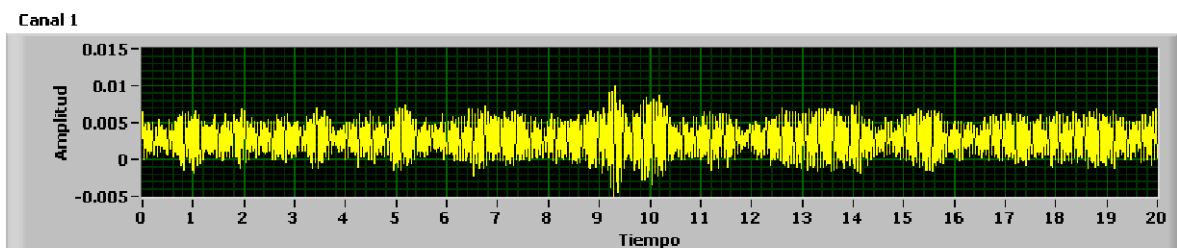


Figura 59. Serie de tiempo horizontal graficada en el módulo.

Para comparar a mayor detalle ambas series de tiempo, se hace una ventana de cinco segundos la cual es mostrada en la figura 60. Se puede observar que las series de tiempo son muy similares.

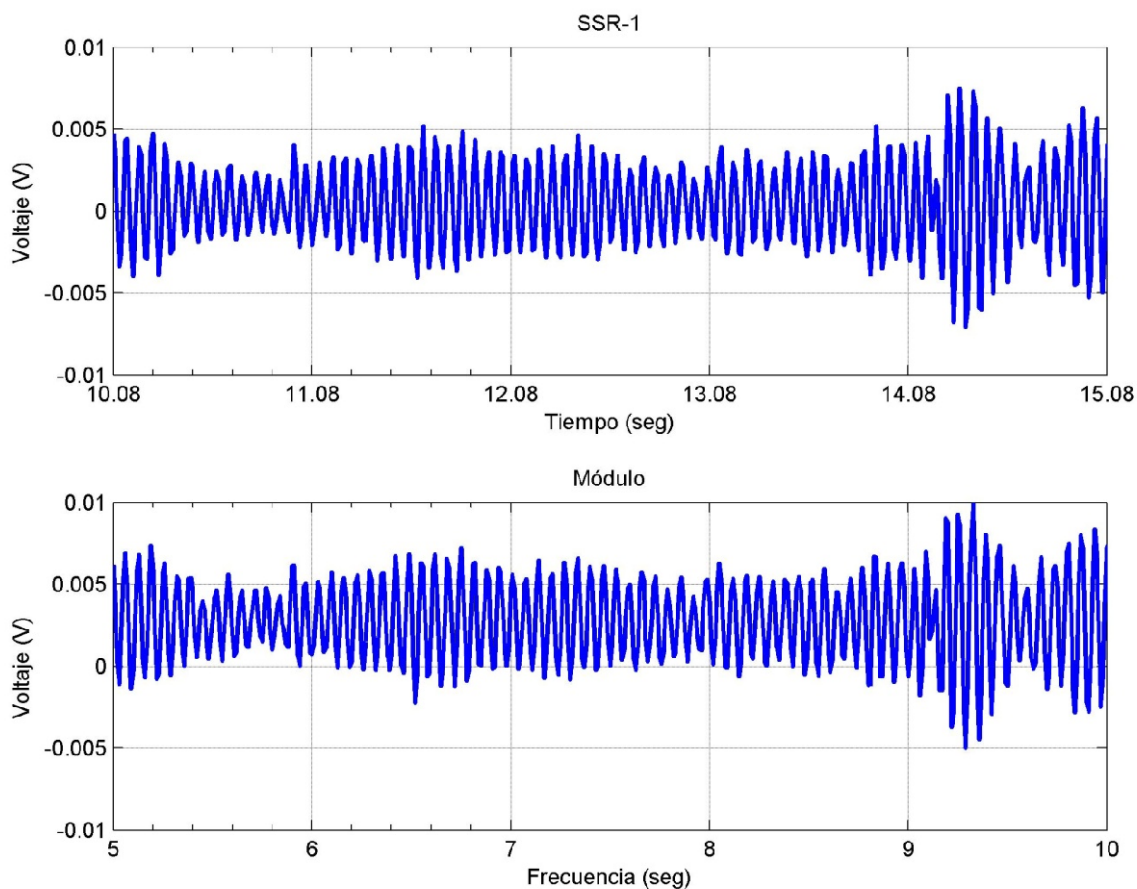


Figura 60. Ventana de comparación de las series de tiempo SSR-1 vs Módulo.

También se hace la comparación del canal horizontal en el dominio de la frecuencia, en las figuras 61 y 62 se observa el espectro del módulo y SSR-1 respectivamente. En estas figuras se puede observar que ambas tienen la misma forma y amplitud.

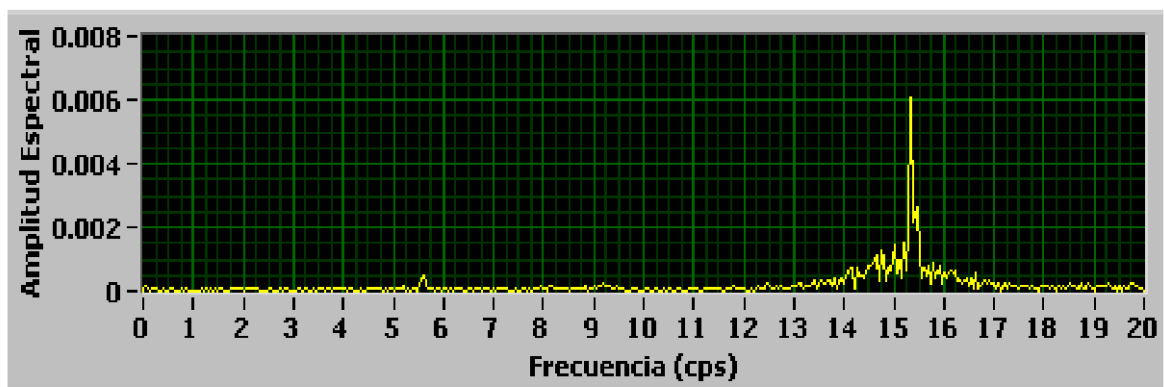


Figura 61. Espectro de Fourier obtenido con el módulo.

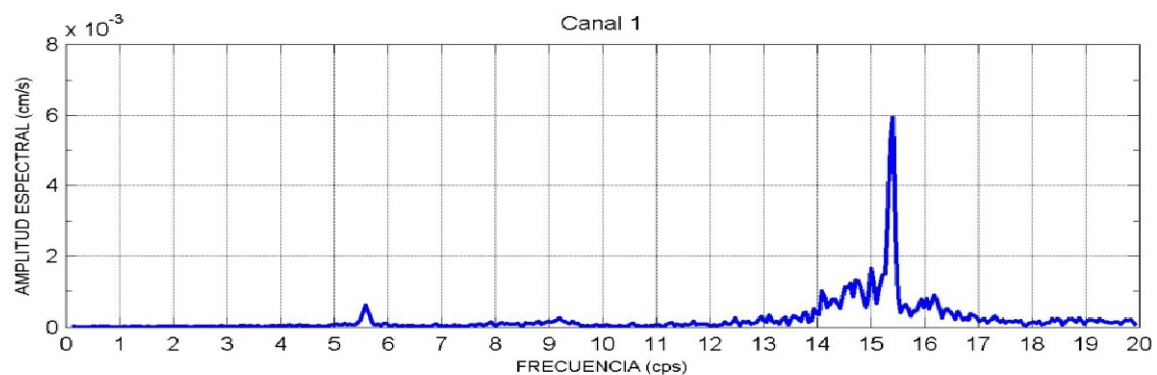


Figura 62. Espectro de Fourier de canal horizontal grabado en SSR-1.

Para el canal vertical, la serie de tiempo se muestra en la figura 63. Se observa que la forma de la serie es muy similar, ambas tienen un offset que es corregido en el procesamiento. La línea roja en la figura es para alinear ambas series debido a que no se tiene el mismo tiempo de inicio de adquisición en los equipos.

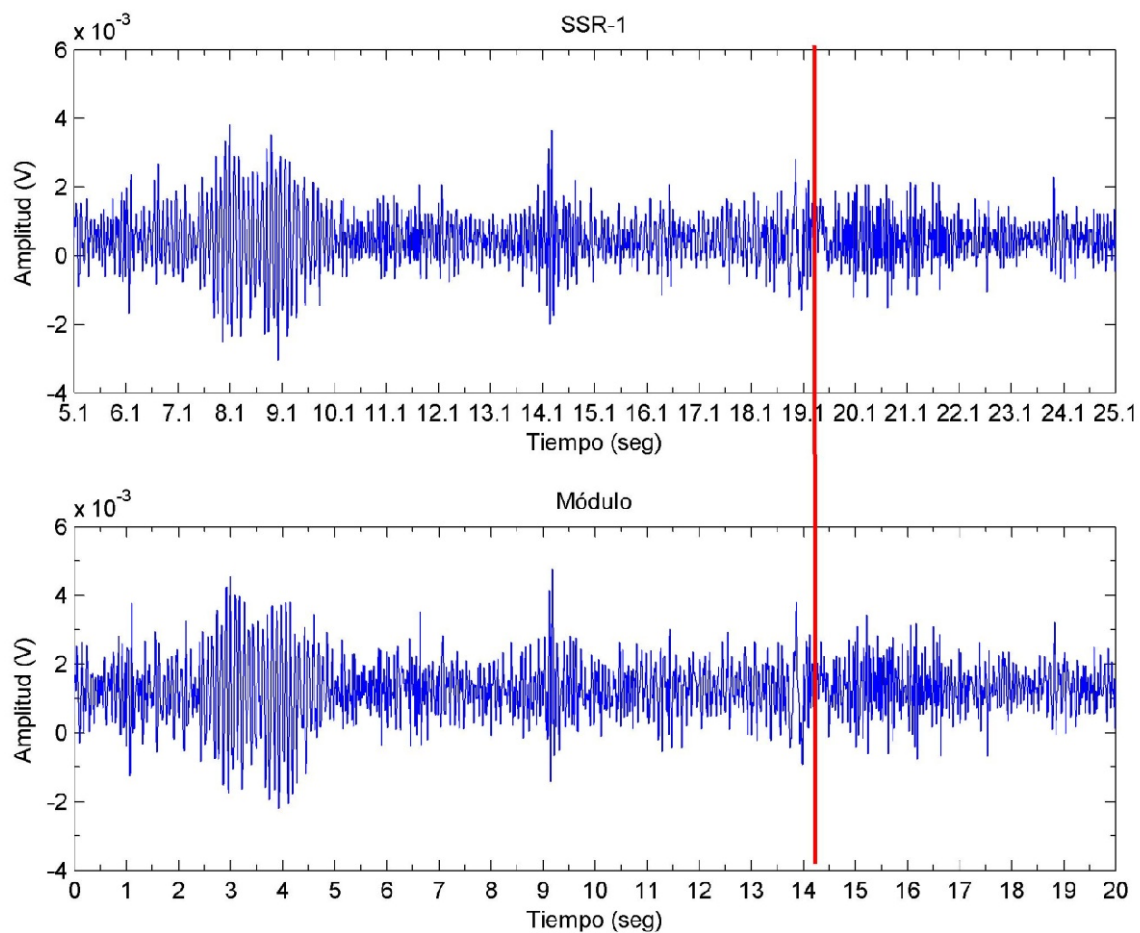


Figura 63. Comparación de las series de tiempo verticales del SSR-1 vs Módulo.

En la figura 64 se muestra la serie de tiempo graficada con el programa del módulo.

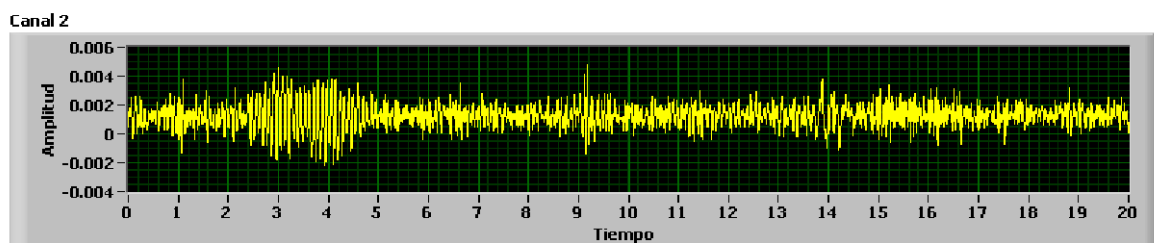


Figura 64. Serie de tiempo vertical graficada en módulo.

Se hace una ventana de cinco segundos para comparar a mayor detalle las series de tiempo, se observa que la adquisición de la señal en ambos equipos es muy similar, lo que puede verse en la figura 65.

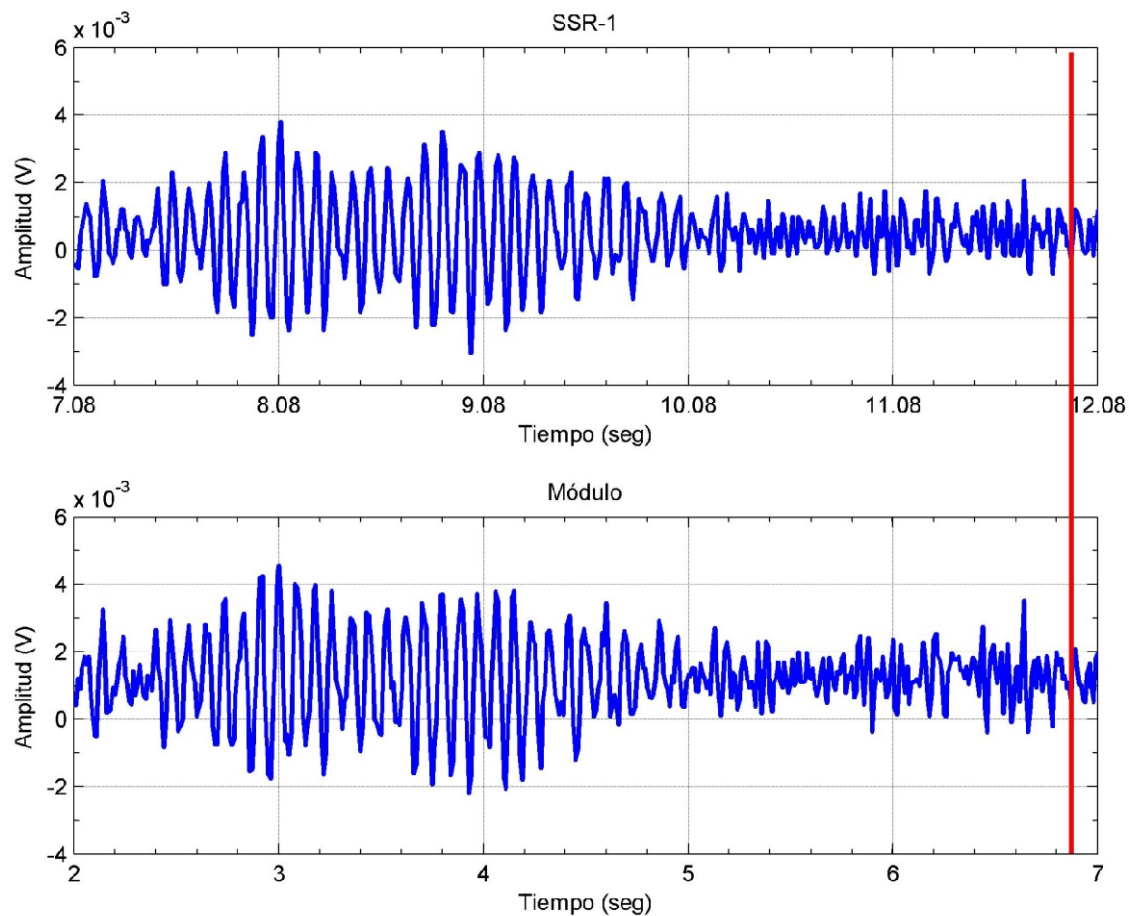


Figura 65. Ventana de comparación de serie de tiempo vertical.

De igual manera, al comparar los espectros de Fourier para el canal vertical, estos son muy similares en forma y amplitud, tal y como lo muestran la figura 66 para el módulo y figura 67 para el SSR-1.

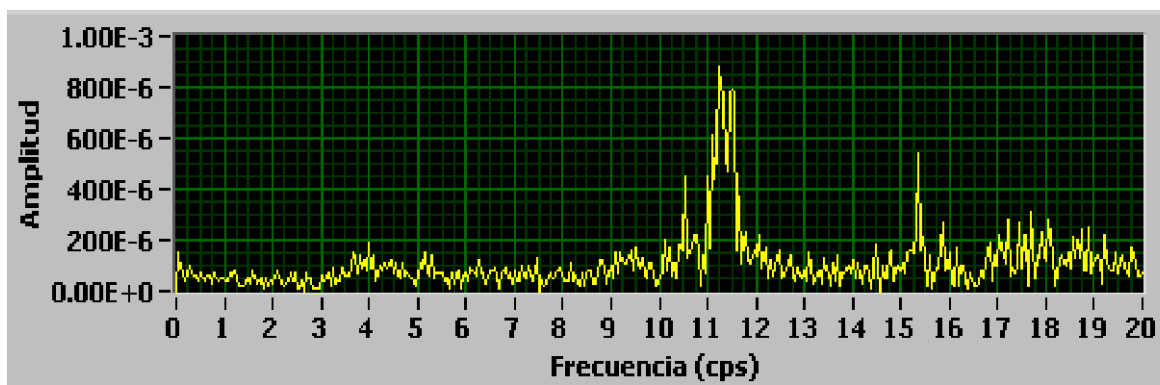


Figura 66. Espectro de Fourier del canal vertical en el Módulo.

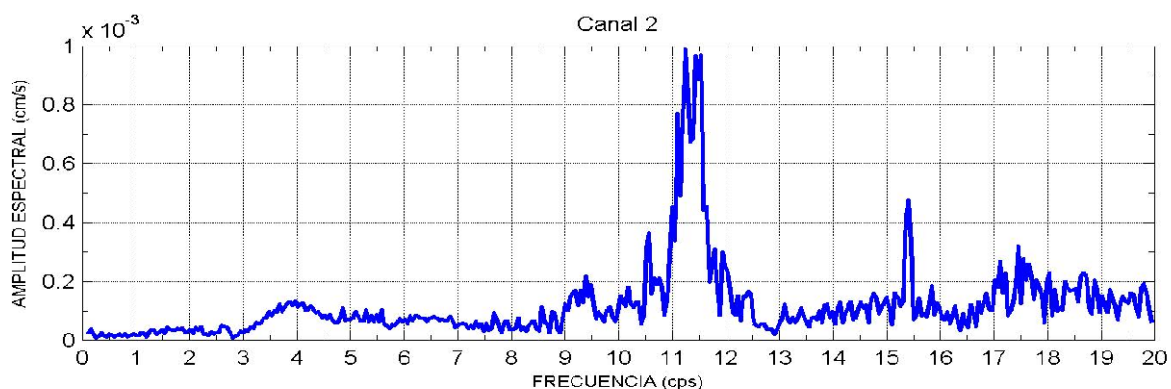


Figura 67. Espectro de Fourier del canal vertical con procesado para SSR-1.

La segunda prueba consistió en excitar los sensores moviendo para ello la mesa de prueba donde se colocaron. Se realizaron tomas de datos de 20 segundos a 100 muestras por segundo a ganancia unitaria, utilizándose filtros a 50 Hz para el SSR y 50 Hz para el filtro digital del módulo.

En la figura 68 se observan las series de tiempo obtenidas en el SSR-2 y módulo al excitar los sensores para el eje horizontal. Se observa de nuevo que estas son muy similares en forma y amplitud. De igual manera hay un pequeño desfase en tiempo por no tener un control en el disparo de inicio simultáneo.

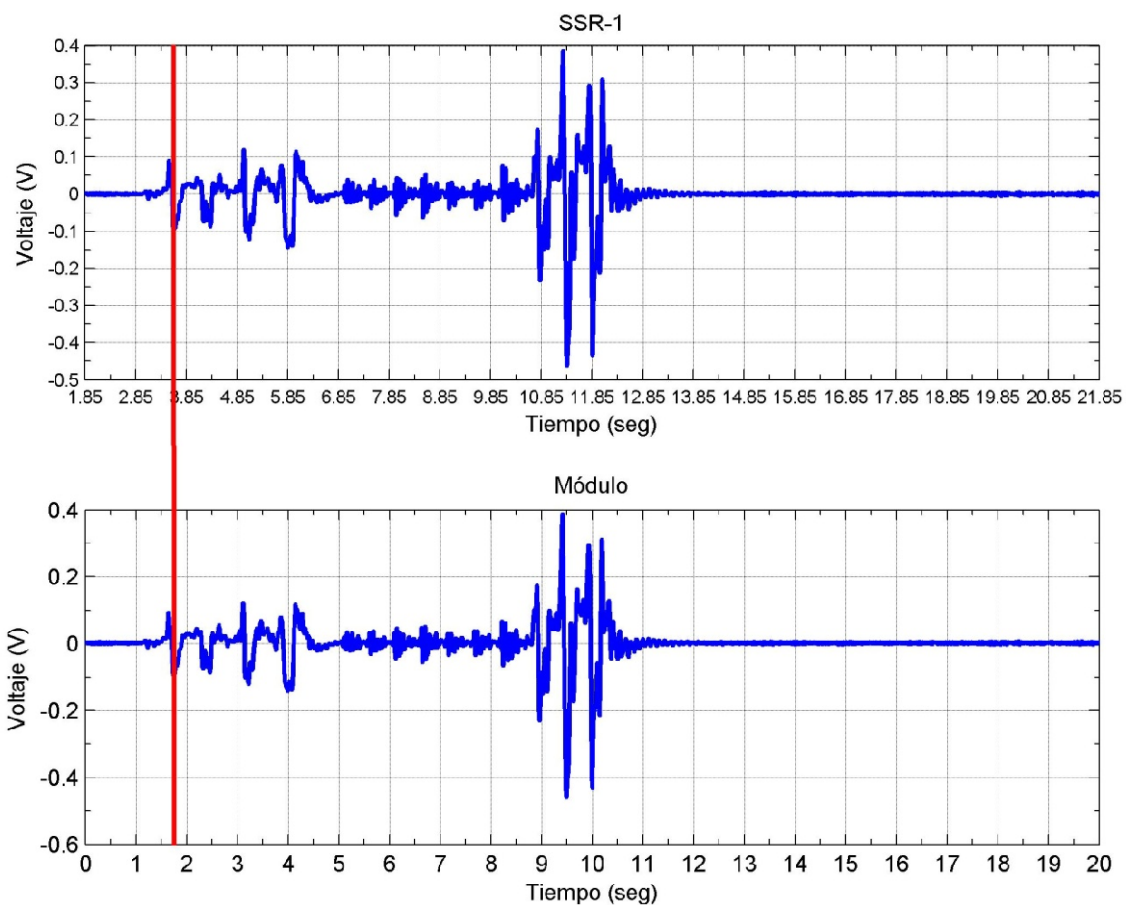


Figura 68. Comparación de series de tiempo horizontales del SSR-1 vs Módulo.

La gráfica de la serie de tiempo obtenida con el programa del módulo se muestra en la figura 69.

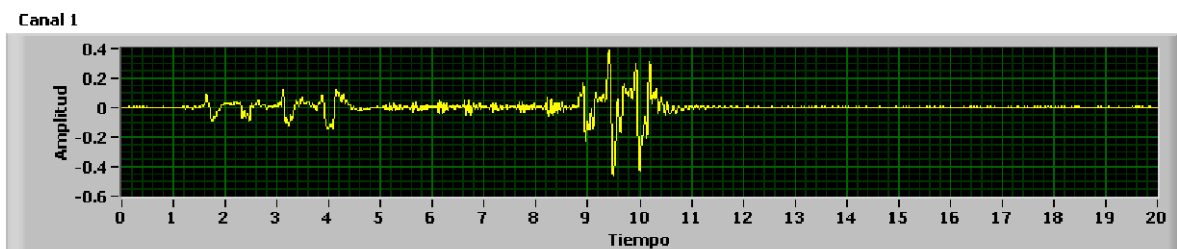


Figura 69. Serie de tiempo obtenida en el programa del módulo.

Los espectros de las series de tiempo anteriores se muestran en las figuras 70 y 71, para el módulo y SSR-1 respectivamente, observándose de nuevo que son muy similares en forma y amplitud.

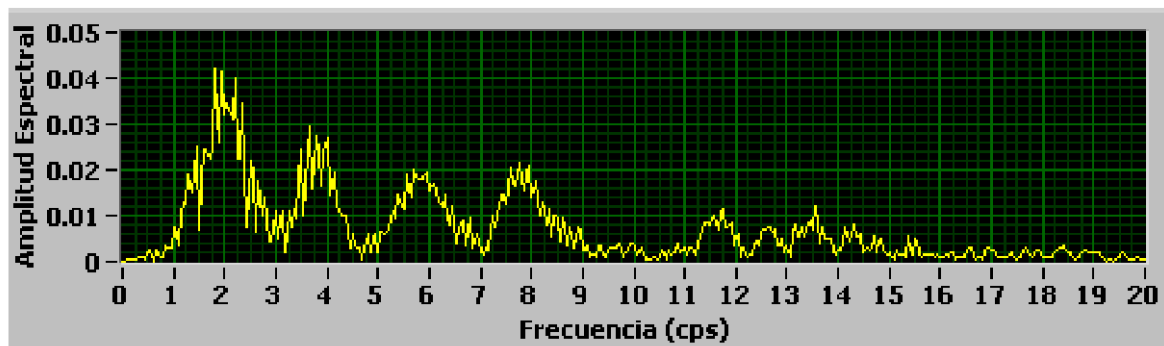


Figura 70. Espectro de Fourier obtenido con el módulo, eje horizontal.

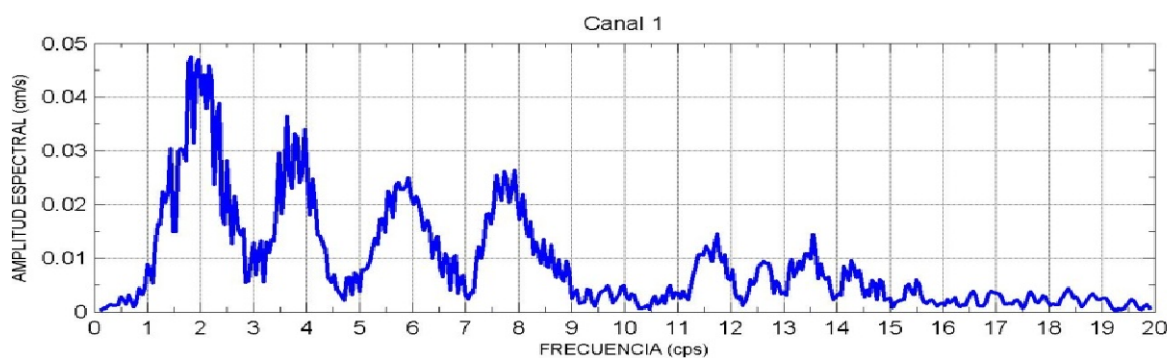


Figura 71. Espectro de Fourier obtenido con el procesado para SSR-1.

Para el canal vertical, la comparación se hace en la figura 72, donde se observa que las formas y amplitudes de la señal obtenida en ambos registradores son muy similares. De igual forma en el tiempo hay un desfase en el inicio de la adquisición.

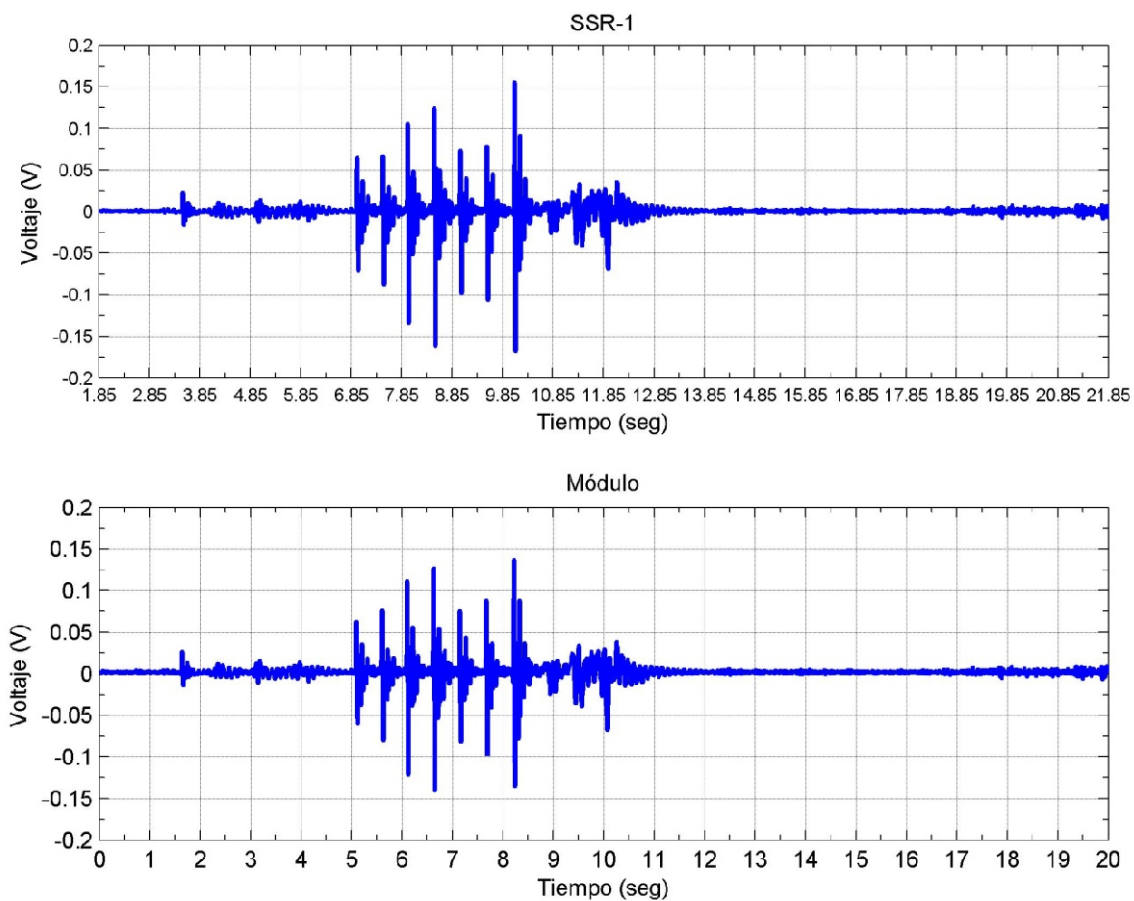


Figura 72. Comparación de series de tiempo del canal vertical, SSR-1 vs Módulo.

La serie de tiempo se obtuvo y se graficó en el módulo para el canal vertical, se muestra en la figura 73.

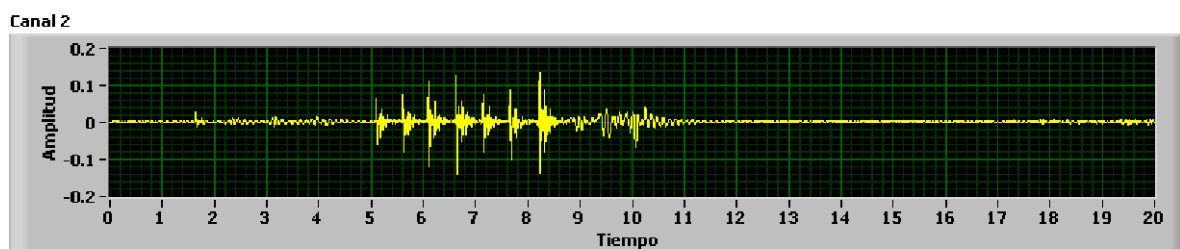


Figura 73. Serie de tiempo graficada en el programa del módulo.

Al comparar los espectros obtenidos en el módulo y con el procesado para el SSR-1, se observan que son muy similares en forma y amplitud, como lo muestran las figuras 74 y 75 para el módulo y SSR-1 respectivamente.

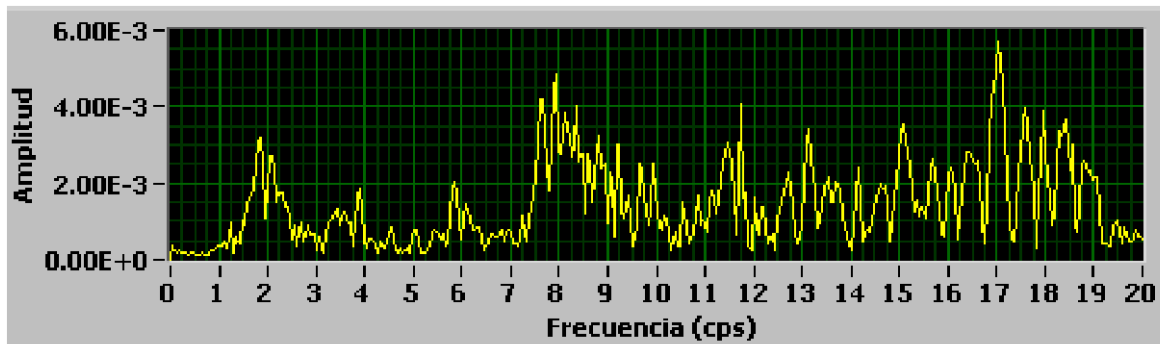


Figura 74. Espectro de Fourier del canal vertical con el módulo.

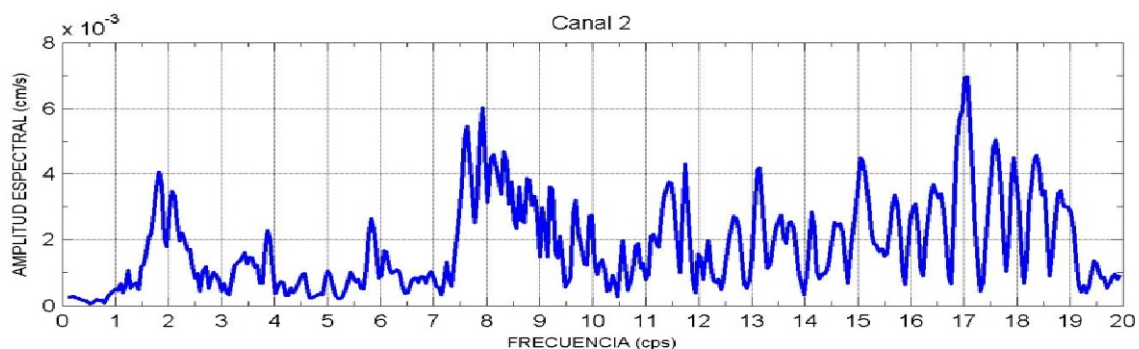


Figura 75. Espectros del canal vertical con el procesado para el SSR-1.

Se hicieron varias pruebas, como las mostradas anteriormente, observándose en todas ellas que las series de tiempo obtenidas y sus espectros son muy similares en ambos equipos.

Finalmente en la figura 76, se muestra el diagrama a bloques del programa final para la adquisición de datos, procesado y visualización gráfica de resultados.

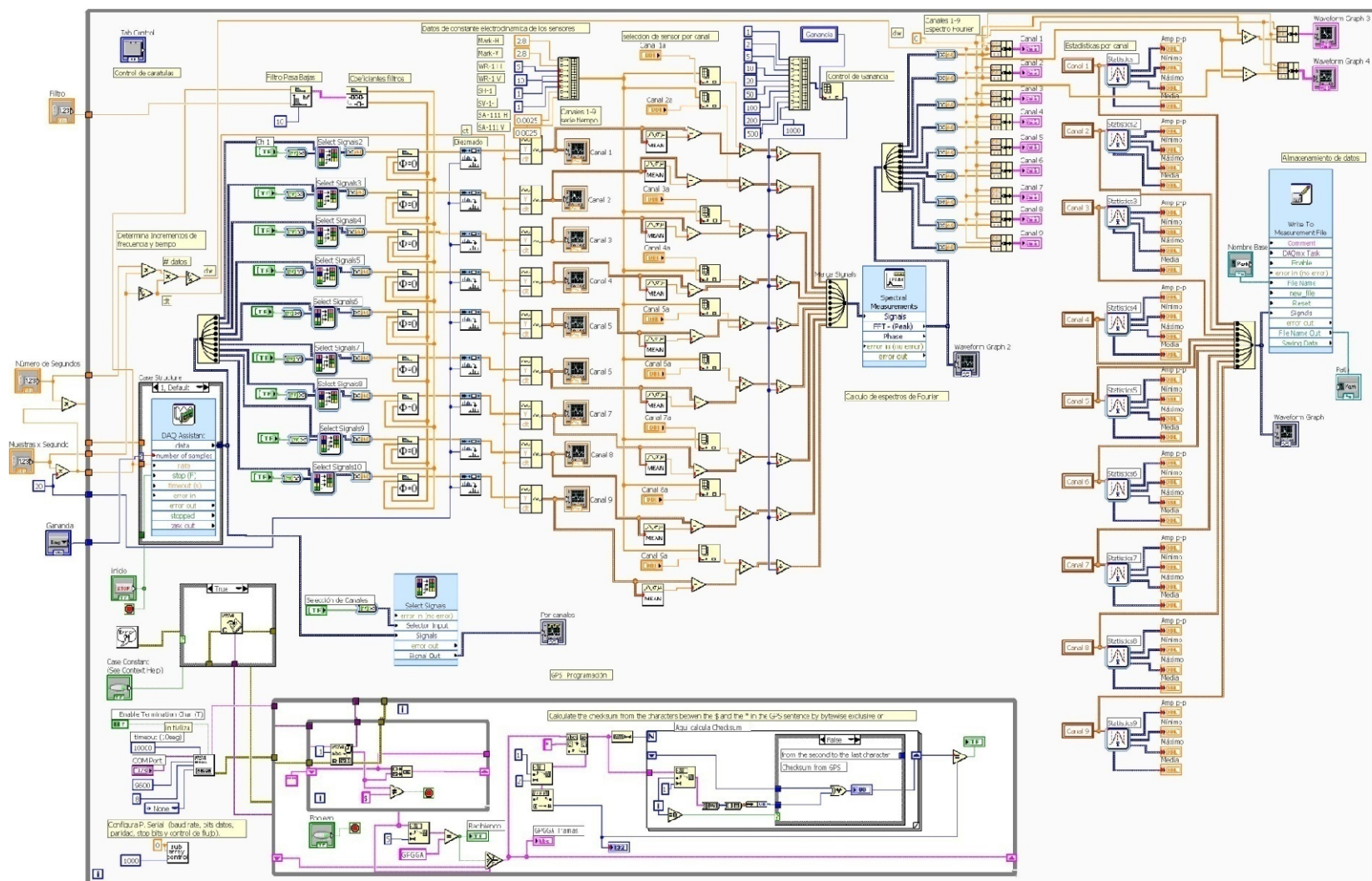


Figura 76. Diagrama a bloques del programa final.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Introducción

Una vez que fue probada cada una de las partes del programa, los filtros analógicos y el sistema de alimentación, se procedió a calibrar el instrumento a través de otro equipo de medición. En este caso se realizó la calibración con un equipo SSR-1 de la marca Kinemetrics.

Para ello se configuró el SSR-1 para adquirir datos con las siguientes características:

- 100 muestras por segundo.
- Ganancia unitaria.
- Filtros a 50 Hz.

El módulo se configuró para adquirir:

- 100 muestras por segundo (internamente realiza el muestreo a 2000 muestras por segundo y se diezman los datos para que queden a las 100 muestras por segundo tal y como lo selecciona el usuario).
- Ganancia unitaria.
- Filtros digitales de decimo orden a 50 Hertz y filtros analógico de octavo orden tipo Bessel a una frecuencia de corte de 158 Hz.

Para realizar la calibración se utilizaron dos sismómetros Mark-L4, uno horizontal y otro vertical, colocados en los canales 1 y 2 respectivamente, los cuales fueron conectados en forma simultánea a ambos equipos. Los sismómetros se colocaron en suelo y sobre un escritorio, realizándose varias pruebas en estas ubicaciones, algunas de ellas fueron sin excitación y en otras se introdujeron excitaciones. Estas excitaciones fueron dando una pequeña tensión al cable del sensor o ligeros golpes al escritorio.

4.2. Resultados en las series de tiempo

Al realizar la comparación de las series de tiempo obtenidas en las pruebas de vibración ambiental, se observó que estas son muy similares en forma y amplitud en ambos equipos. Se obtienen así resultados satisfactorios que cumplen necesidades del laboratorio. En la figuras 77 y 78, se muestran las series obtenidas con ambos equipos donde el sensor esta sobre el escritorio. En la figura 78 se hace una ventana de cinco segundos para comparar con más detalle los resultados.

En las series de tiempo obtenidas con el módulo se observa un pequeño offset, el cual no afecta en el procesado de los datos, este es removido en el procesamiento.

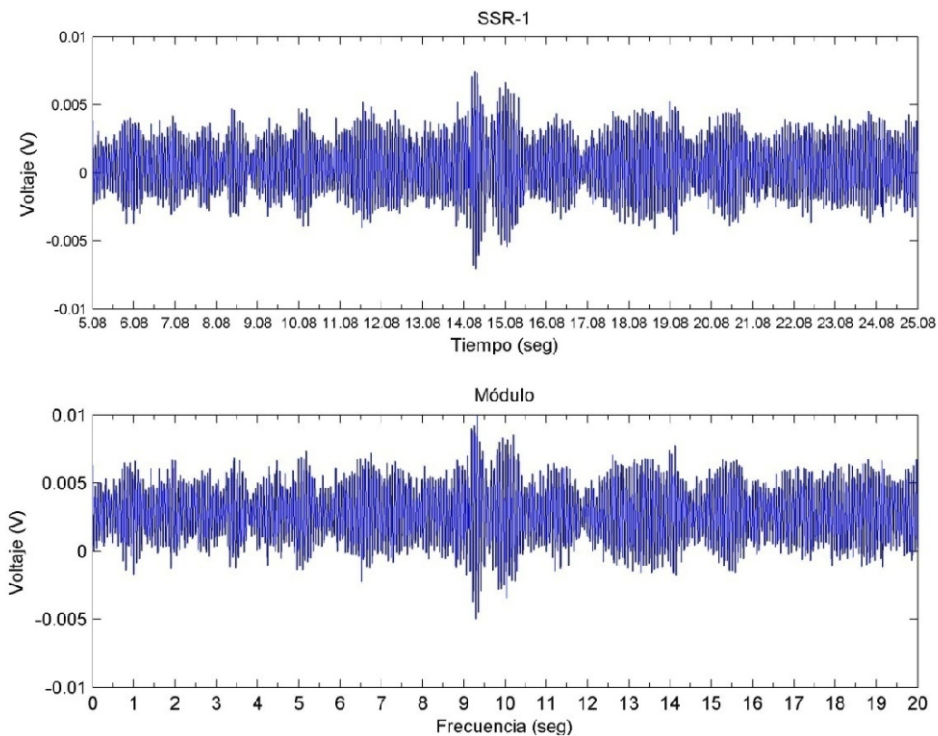


Figura 77. Series de tiempo del canal horizontal obtenidas con SSR-1 y Módulo.

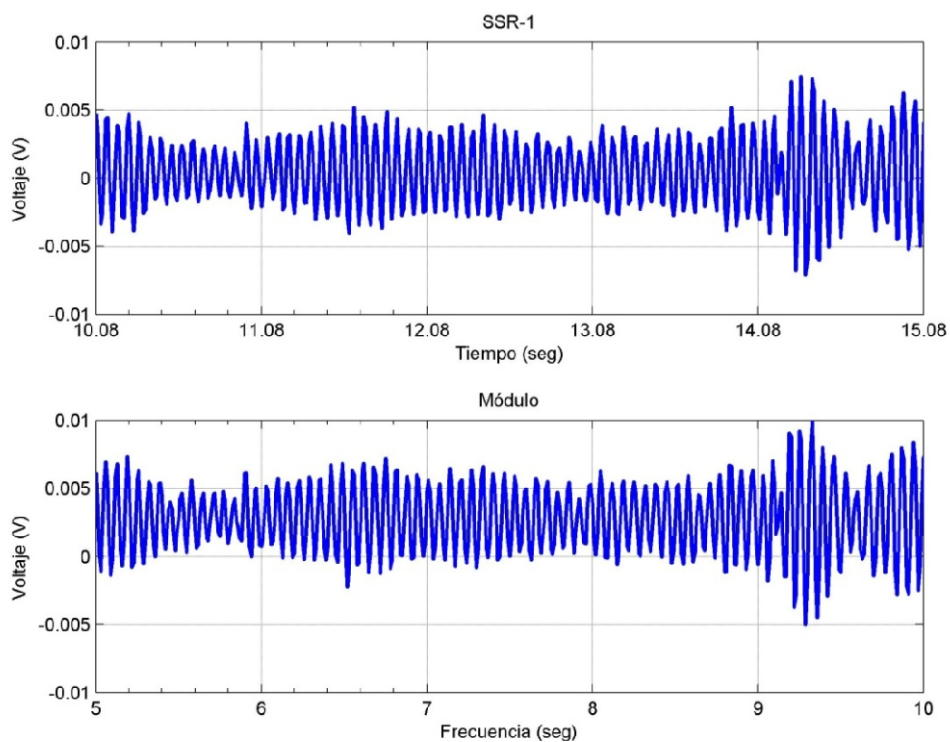


Figura 78. Serie de tiempo horizontal, comparación a mayor detalle.

De igual manera, al comparar las series de tiempo con excitación de las diferentes pruebas realizadas, se observó que las formas y amplitudes de estas son muy similares en ambos equipos. Los resultados obtenidos son satisfactorios. En la figura 79 se muestra un ejemplo con excitación obtenido con ambos equipos, el sensor se instaló sobre el escritorio.

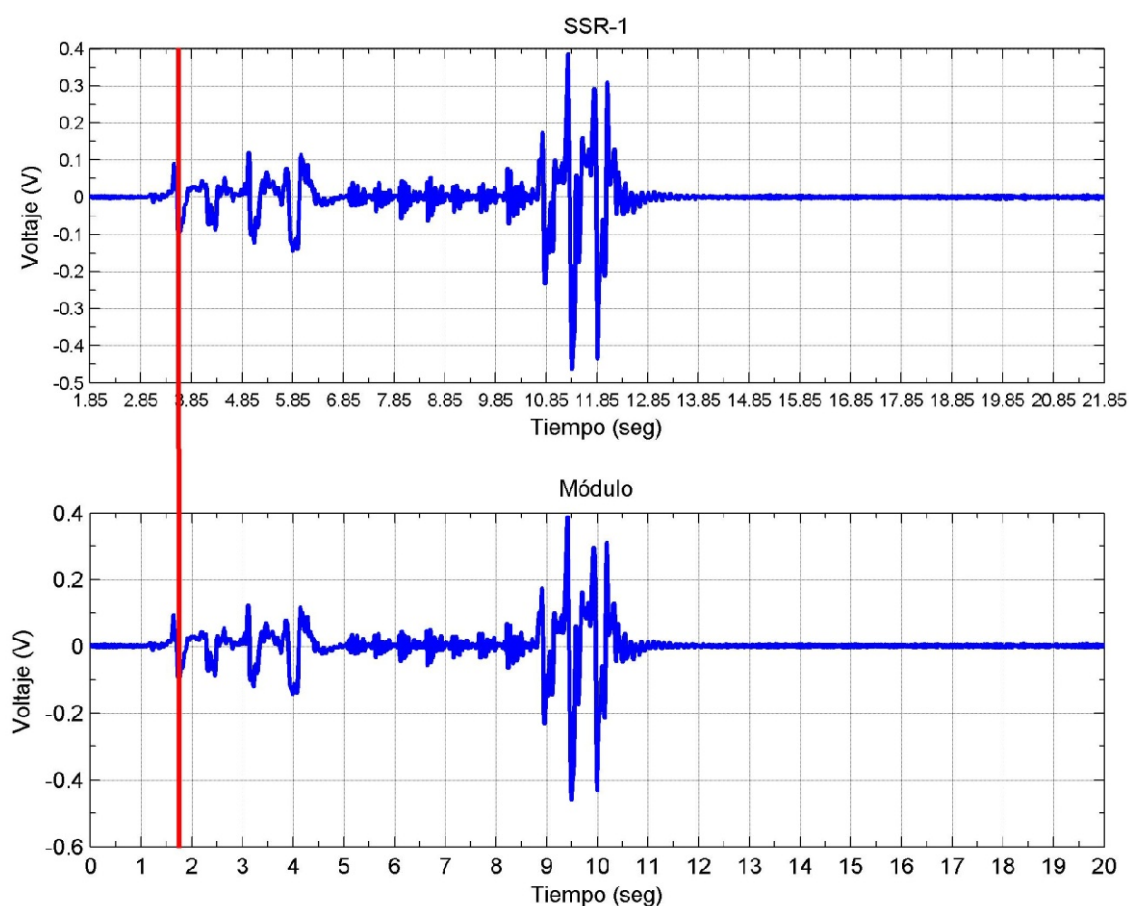


Figura 79. Comparación de serie de tiempo con excitación en SSR-1 y módulo.

En la figura 80 se muestra la comparación con excitación con el sensor instalado en el suelo, donde las formas y amplitudes son similares. En el caso de la amplitud varia ligeramente y esto puede ser debido a que el tiempo en que se toma la muestra es diferente en cada equipo por no poder tener un control de inicio de

muestreo simultáneo. La excitación para esta prueba se realizó haciendo saltos sobre el suelo durante el tiempo de adquisición.

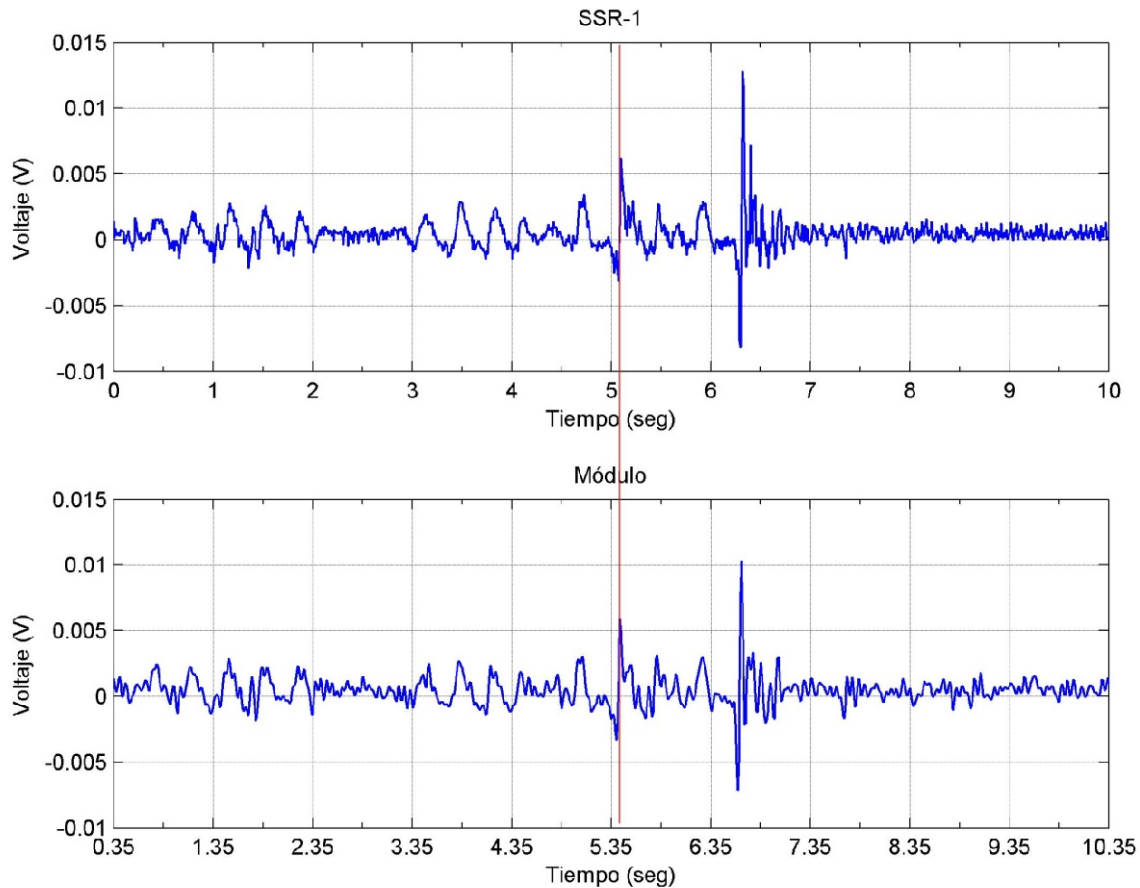


Figura 80. Comparación con excitación y sensor instalado en suelo.

En la figura 81 se muestra la comparación sin excitación con sensor instalado en el suelo, debido a que el sitio de medición es más estable (roca) y el sensor utilizado no es lo suficientemente sensible para medir los movimientos del sitio, se tienen series de tiempo donde los equipos no alcanzan a definir el movimiento y domina el ruido electrónico. Para este tipo de situaciones se deben utilizar sismómetros o acelerómetros más sensibles como es el caso del acelerómetro WR-1.

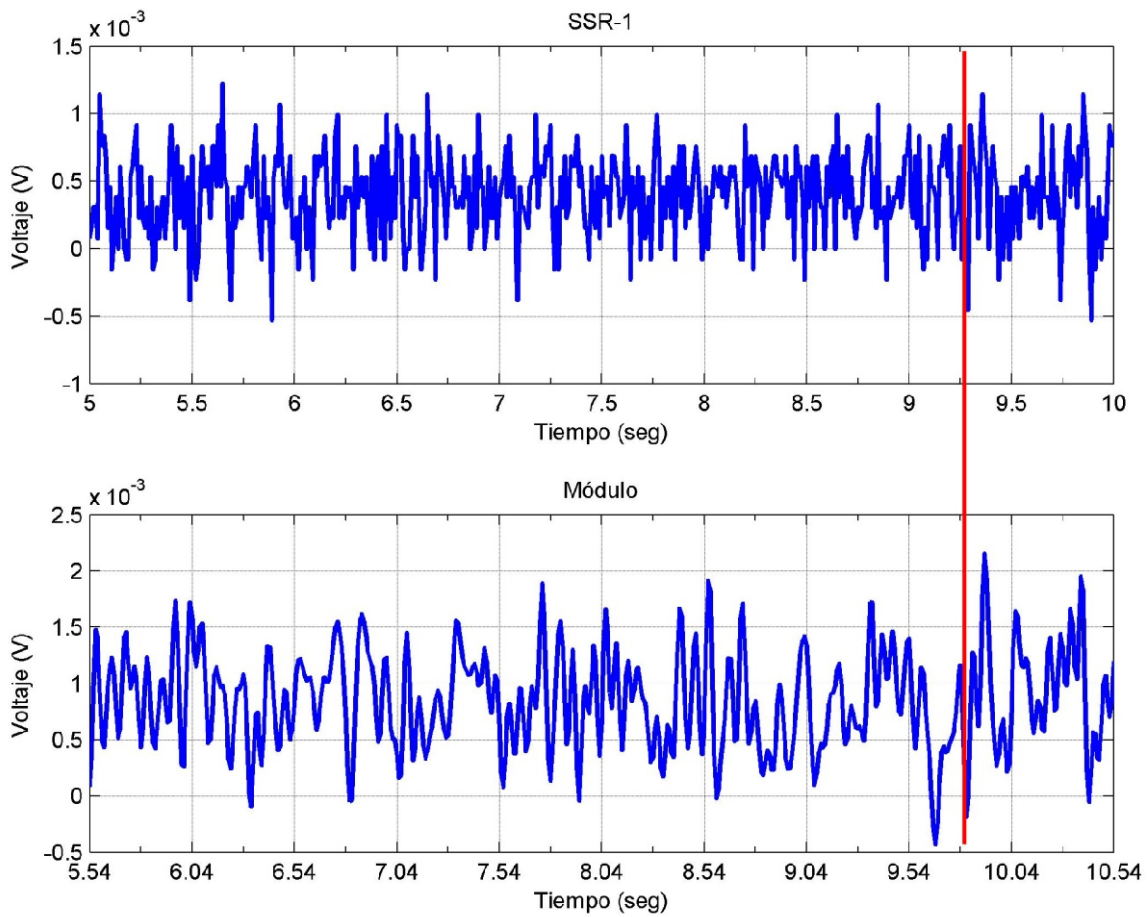


Figura 81. Comparación sin excitación con sensor instalado en suelo.

4.3. Resultados de Espectros de Fourier

A las series de tiempo anteriores se les calculó el Espectro de Fourier, tanto en el módulo como en el SSR-1, obteniéndose resultados satisfactorios, ya que estos son muy similares en ambos equipos en forma y amplitud, como se muestra en el ejemplo de las figura 82 y 83. En la figura 82 se presenta el espectro obtenido con el programa desarrollado en Labview y el módulo, en la figura 83 con el paquete de procesado para SSR-1, para una muestra sin excitación sobre el escritorio.

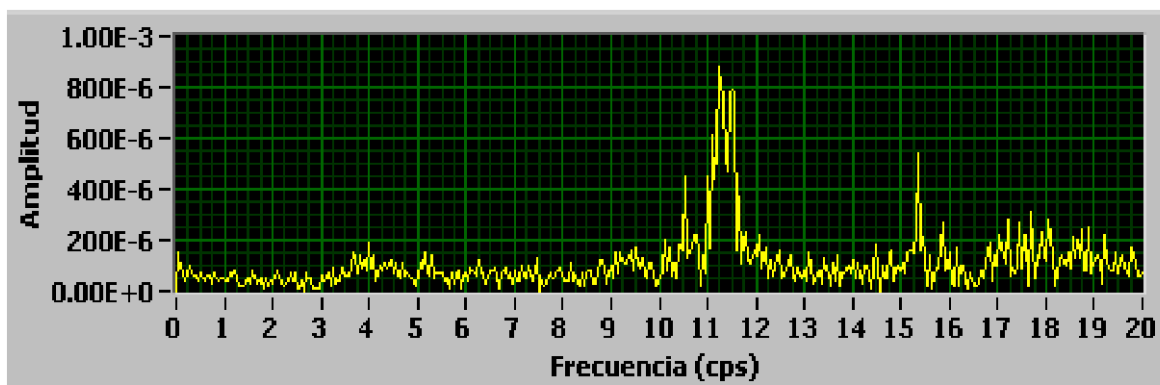


Figura 82. Espectro de Fourier calculado con Labview.

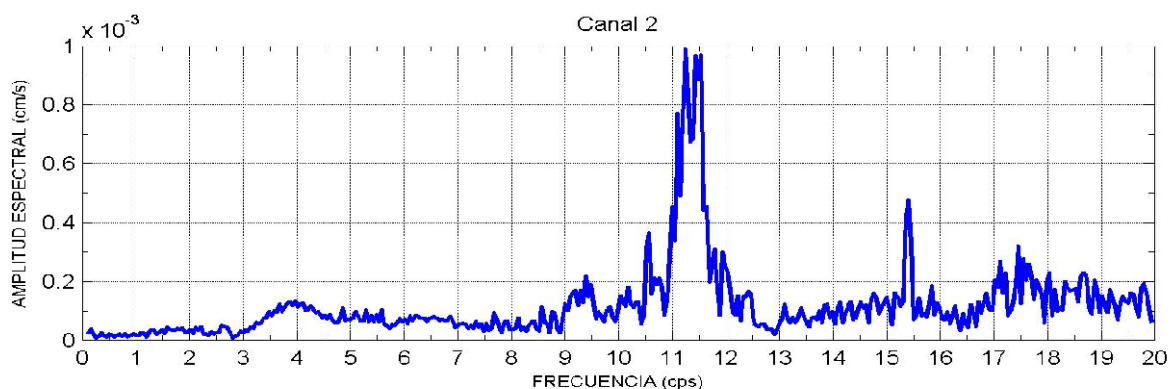


Figura 83. Espectro de Fourier calculado con el paquete de procesado para SSR-1.

Se calcularon los Espectros de Fourier de las series de tiempo con excitación, se observó que los resultados obtenidos con el programa de labview y con el paquete de procesado del SSR-1 son similares, de igual manera estos resultados son satisfactorios para el propósito de este proyecto. Un ejemplo de estos resultados se muestran en las figuras 84 y 85, que presentan el espectro de Fourier calculados con Labview y el paquete de procesado para el SSR-1.

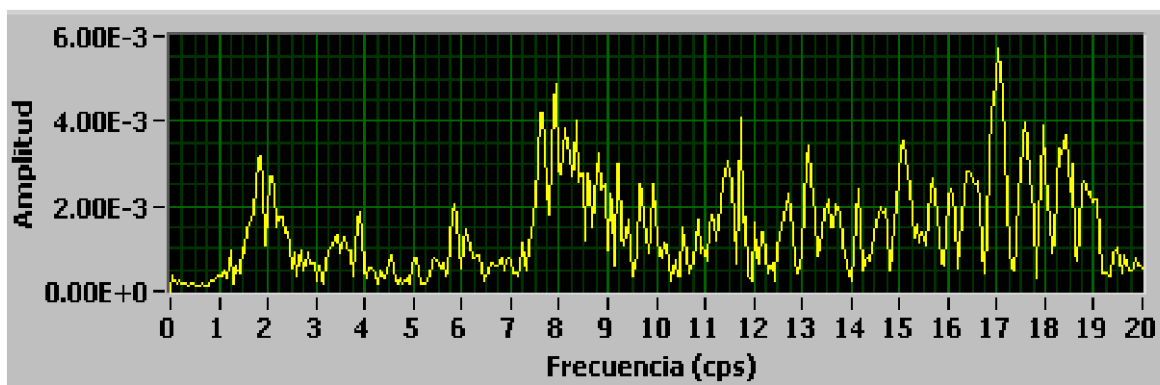


Figura 84. Espectro de Fourier con excitación calculado con Labview.

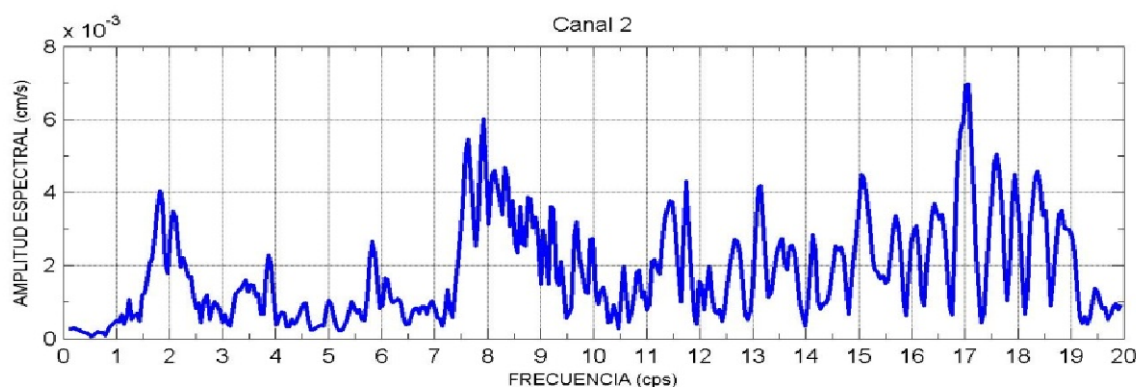


Figura 85. Espectro de Fourier con excitación calculado con procesado para SSR-1.

En la figura 86 se muestra la carátula principal del programa, donde se hizo una toma de datos con una ventana de 180 segundos a 100 muestras por segundo, el filtro digital en 20 Hz, con ganancia unitaria y en adquisición los nueve canales de datos. Se instalaron tres sensores Mark-L4 y se conectaron en forma simultánea a los nueve canales de entrada, es decir canales 1, 3 y 6 con la misma señal de entrada, e igualmente para los canales 2, 4 y 8, canales 3, 5 y 9. El sitio de medición fue en el LISAI con los sensores instalados en el entre piso del edificio, durante la medición se brinco para excitar a los sensores.



Figura 86. Caratula principal, medición de 180 segundos y nueve canales activados.

Los resultados de esta toma de datos se muestran en la figura 87, se presentan los canales 1, 2 y 3. Tanto en serie de tiempo como su espectro correspondiente por canal. Finalmente el peso del archivo de datos con una ventana de 180 segundos a una razón de muestro de 100 muestras por segundo y utilizando los nueve canales de datos es de 1729 Kb.

En la figura 88 se muestra otra toma con una ventana de 600 segundos a una razón de muestro de 100 muestras por segundo, con filtro digital en 20 Hz, nueve canales en adquisición, sin excitación a los sensores y en el mismo sitio de medición que la toma anterior. Como resultado se tiene que el archivo tiene un peso de 5826 Kb.

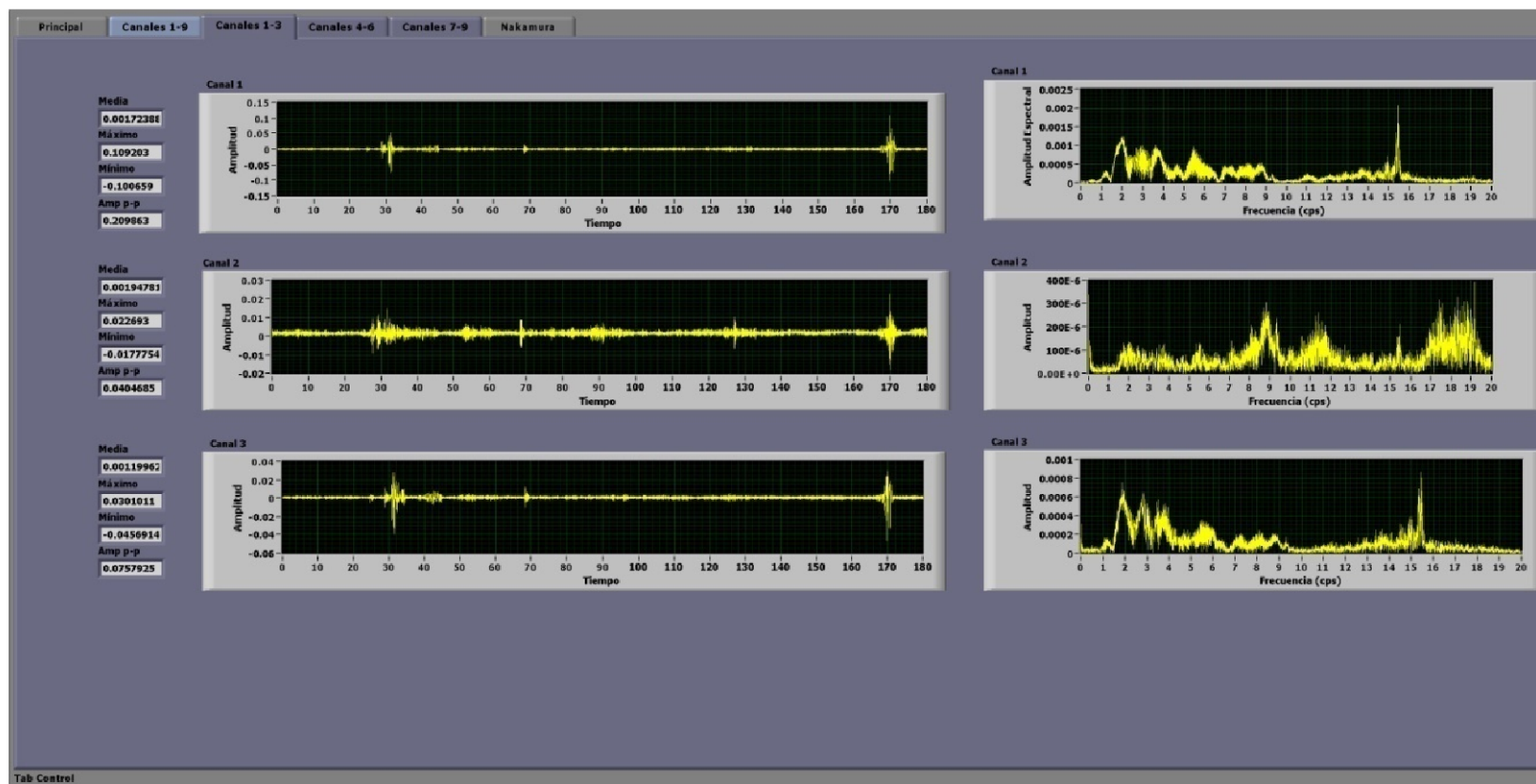


Figura 87. Canales 1, 2, 3, 180 segundos de datos y espectros de Fourier.

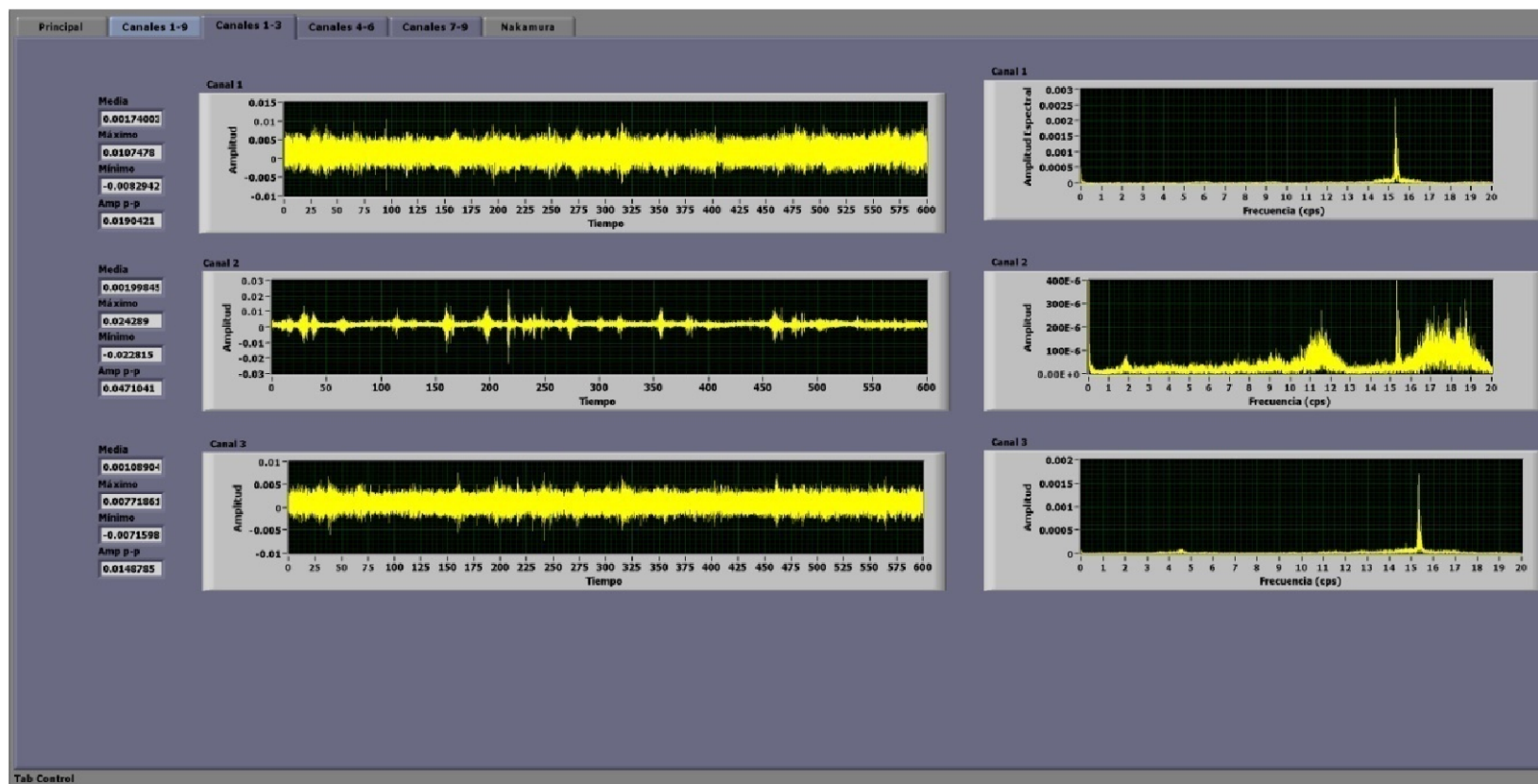


Figura 88. Canales 1, 2, 3, 600 segundos de datos y espectros de Fourier.

Finalmente en la figura 89 se muestra el formato del archivo de datos que almacena el módulo, se observa que este archivo: encabezado, el número de canales, el número de muestras por canal, la fecha, la hora de la computadora en que inicio la toma, el incremento en tiempo, las columnas de tiempo y datos, además de la trama del GPS cuando inició la toma de datos.

VA-GPS_028 - Notepad

File Edit Format View Help

LabVIEW Measurement
 Writer_Version 2
 Reader_Version 2
 Separator Tab
 Decimal_Separator .
 Multi_Headings No
 X_Columns One
 Time_Pref Relative
 Operator R000110
 Date 2010/06/16
 Time 11:31:55.859375
 End_of_Header

Channels 9
 Samples 60000 60000 60000 60000 60000 60000 60000 60000 60000
 Date 2010/06/16 2010/06/16 2010/06/16 2010/06/16 2010/06/16 2010/06/16 2010/06/16 2010/06/16 2010/06/16
 Time 11:31:55.859375 11:31:55.859375 11:31:55.859375 11:31:55.859375 11:31:55.859375 11:31:55.859375 11:31:55.859375 11:31:55.859375 11:31:55.859375
 X_Dimension Time Time Time Time Time Time Time Time Time
 X0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0
 Delta_X 0.010000 0.010000 0.010000 0.010000 0.010000 0.010000 0.010000 0.010000 0.010000
 End_of_Header

X_Value	Untitled	Untitled 1	Untitled 2	Untitled 3	Untitled 4	Untitled 5	Untitled 6	Untitled 7	Untitled 8	Comment
0.000000	-0.000329	0.000170	-0.000218	-0.000300	0.000181	-1.894838E-28	-0.000306	0.000191	-0.000198	GP0GA,183322,3152.0808,N,11639.8685,W,2,06,1.7,34.9,M,-34.2,M,*,46
0.010000	0.000663	0.001159	0.000379	0.000640	0.001179	-6.817454E-29	0.000639	0.001200	0.000439	
0.020000	0.002929	0.002356	0.002193	0.003006	0.002367	1.342244E-27	0.003010	0.002379	0.002237	
0.030000	0.004215	0.003123	0.003479	0.004283	0.003144	2.190760E-27	0.004265	0.003148	0.003480	
0.040000	0.003353	0.003026	0.003186	0.003398	0.003074	2.164193E-27	0.003353	0.003070	0.003151	
0.050000	0.000680	0.002308	0.001315	0.000707	0.002382	7.999973E-28	0.000665	0.002366	0.001289	
0.060000	-0.001537	0.001603	-0.000514	-0.001527	0.001680	-5.054692E-28	-0.001520	0.001641	-0.000500	
0.070000	-0.001403	0.001383	-0.000757	-0.001405	0.001439	-4.425497E-28	-0.001335	0.001380	-0.000715	
0.080000	0.001090	0.001627	0.000686	0.001082	0.001650	6.151170E-28	0.001176	0.001537	0.000712	
0.090000	0.003866	0.002030	0.002298	0.003863	0.002017	1.556956E-27	0.003919	0.002001	0.002279	
0.100000	0.004600	0.002358	0.002483	0.004612	0.002308	1.291425E-27	0.004600	0.002331	0.002439	
0.110000	0.002689	0.002533	0.001065	0.002721	0.002456	5.401222E-28	0.002660	0.002484	0.001049	
0.120000	-0.000178	0.002484	-0.000607	-0.000132	0.002411	-9.205015E-20	-0.000202	0.002407	-0.000534	
0.130000	-0.001434	0.002154	-0.001003	-0.001386	0.002119	-9.290283E-28	-0.001445	0.002080	-0.000897	
0.140000	0.000146	0.001695	0.000161	0.000182	0.001710	1.249564E-28	0.000140	0.001661	0.000257	
0.150000	0.003300	0.001472	0.001742	0.003311	0.001522	1.287696E-27	0.003279	0.001481	0.001771	
0.160000	0.005280	0.001669	0.002302	0.005259	0.001742	1.236790E-27	0.005234	0.001695	0.002261	
0.170000	0.004251	0.001980	0.001427	0.004202	0.002085	7.899517E-28	0.004186	0.002011	0.001364	
0.180000	0.001011	0.001917	1.816535E-5	0.000949	0.002067	2.143965E-28	0.000945	0.001974	-9.060251E-6	
0.190000	-0.001604	0.001472	-0.000603	-0.001658	0.001635	-4.703429E-28	-0.001651	0.001566	-0.000570	
0.200000	-0.001232	0.001242	9.834844E-5	-0.001261	0.001352	3.658611E-29	-0.001252	0.001332	0.000176	
0.210000	0.001816	0.001733	0.001446	0.001817	0.001748	1.095923E-27	0.001814	0.001754	0.001532	
0.220000	0.004732	0.002656	0.002225	0.004751	0.002609	1.268655E-27	0.004731	0.002595	0.002283	
0.230000	0.004736	0.003134	0.001780	0.004783	0.003103	1.029202E-27	0.004735	0.003058	0.001789	
0.240000	0.001691	0.002641	0.000565	0.001696	0.002673	4.095443E-28	0.001706	0.002633	0.000534	
0.250000	-0.001665	0.001588	-0.000298	-0.001672	0.001658	-9.775909E-31	-0.001631	0.001663	-0.000334	
0.260000	-0.002119	0.000926	-1.705435E-5	-0.002230	0.000982	-3.755745E-28	-0.002193	0.001017	-1.851062E-5	
0.270000	0.000592	0.001241	0.001200	0.000583	0.001265	8.140995E-28	0.000569	0.001283	0.001241	
0.280000	0.004198	0.002286	0.002354	0.004198	0.002301	1.744630E-27	0.004119	0.002281	0.002401	

Ln2, Col17

Figura 89. Formato del archivo de datos, incluye datos de GPS.

Los resultados obtenidos con el desarrollo de este equipo de adquisición, son satisfactorios al ser comparados con el equipo de Kinematics SSR-1, tanto en las series de tiempo obtenidas como en los Espectros de Fourier.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

5.1 Introducción

La implementación de un sistema de adquisición de datos para aplicaciones sismológicas que cuente con procesado en tiempo real, con lleva a tener en consideración sus características y posibles causas de falla del sistema; esto es, hay que considerar su funcionamiento en las frecuencias de interés, amplitudes a medir de las señales, ruido en el sistema y como eliminarlo sin afectar a la señal deseada y procesos a realizar. Por lo tanto, es importante conocer al detalle las características principales del proyecto, desde la adquisición hasta la presentación gráfica de resultados.

5.2 Conclusiones

Se diseñó, desarrolló e implementó un sistema para la adquisición de datos de vibración ambiental que puede ser utilizado para la medición en suelos y en estructuras para aplicaciones sismológicas. El equipo cuenta con procesado y visualización de resultados en sitio y presenta las siguientes características:

- ✓ Nueve canales de datos.
- ✓ 100 muestras por segundo por canal en incrementos de 50 hasta un máximo 1000.

- ✓ Ganancias programables de 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 para los nueve canales.
- ✓ Filtros analógicos de octavo orden tipo Bessel, con frecuencia de corte de 158 Hz. Con la misma configuración se puede cambiar de circuito integrado para un filtro tipo Butterworth.
- ✓ Filtros digitales de decimo orden de fase cero con frecuencia de corte programable de 5 a 100 Hz en incrementos unitarios.
- ✓ Selector de canales a utilizar.
- ✓ Selector de tipo de sensor a utilizar por canal, de acuerdo a la disponibilidad de sensores del LISAI
- ✓ Graficado de series de tiempo por canal.
- ✓ Graficado de series de tiempo para comparar, seleccionable por usuario.
- ✓ Graficado de Espectros de Fourier por canal.
- ✓ Archivo de datos en formato ASCII.
- ✓ Nombre de archivo de datos e incremento consecutivo para registros continuos.
- ✓ Trayectoria para almacenar archivo de datos.
- ✓ Coordenadas y hora GMT por GPS en caratula y guardadas en archivo de datos.
- ✓ Los datos son compatibles con Matlab.

Por lo anterior se concluye que se cumple satisfactoriamente con el objetivo general de este trabajo:

- ✓ Objetivo General: diseñar y desarrollar, un sistema portátil para uso sismológico con procesamiento y resultados gráficos en sitio.

Al cumplir con el objetivo general del proyecto, se establece que la hipótesis planteada para el proyecto se cumple afirmativamente:

- ✓ Hipótesis: sí se puede desarrollar un equipo portátil para uso sismológico con procesamiento de datos y resultados gráficos en sitio.

Al haber validado la hipótesis del proyecto de forma afirmativa, se puede responder a la pregunta de investigación:

- ✓ Pregunta de investigación: ¿puede desarrollarse un equipo portátil para uso sismológico, con procesamiento de datos en sitio y obtener resultados gráficos?

La contestación a la pregunta de investigación es que sí se puede desarrollar el equipo portátil para uso sismológico. Ahora se tiene en el laboratorio LISAI de CICESE un sistema para el apoyo del desarrollo de la investigación en sismología con las siguientes características:

- ✓ Más ligero que los equipos SSR-1 con un peso aproximadamente de 6 Kg.
- ✓ De menor volumen que los equipos SSR-1.
- ✓ Con puerto de comunicación USB.
- ✓ Procesado y resultados gráficos en sitio.
- ✓ Con nueve canales de datos.
- ✓ Con datos de GPS.
- ✓ Compatible con Windows XP.
- ✓ Realizado en función a las necesidades del usuario del Laboratorio LISAI.

Con lo anterior se cubren muchas de las necesidades del laboratorio LISAI, de contar con un equipo de mayor aplicación y obtención de resultados en sitio, además de tener la característica de poder modificar el programa de acuerdo a las necesidades de los proyectos.

5.3. Trabajos futuros

Como trabajos futuros están:

- Aumentar de nueve a 18 canales de datos.
- Programar el sistema para que adquiera registros de sismos por umbral y no sólo en modo continuo.
- Desarrollar las aplicaciones para el control del módulo de adquisición y controlar la ganancia por canal.
- Sustituir la dependencia de la computadora por una tarjeta del tipo embebido que permita :
 - Instalar el programa de Labview.
 - Almacenar los datos en una memoria USB o disco duro.
 - Comunicación con la computadora por puerto USB para configurar y extraer datos.

Los trabajos futuros son múltiples ya que el sistema puede adaptarse a las necesidades que vayan surgiendo en nuevos proyectos de investigación aplicada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Nava Pichardo. "Terremotos". D.F., México. Libro. Fondo de Cultura Económica, S.A. DE C.V. Tercera Edición (1998). ISBN 968-16-5768-3

- [2] P. E. Cuadra Monreal. "Aplicación de técnicas de vibraciones ambientales: análisis de microtemores y vibraciones naturales, para la caracterización de sitio". Sartenejas, Venezuela. Tesis licenciatura. Universidad Simón Bolívar. (2007).

- [3] G. K. Ibarra Torúa. "Microzonación de periodos dominantes en los principales centros urbanos de Baja California". Ensenada, B.C., México. Tesis de maestría. CICESE. (2004).

- [4] L. H. Mendoza Garcilazo, J. G. Acosta Chang, C. Huerta López, A. Reyes Zamora, J. Otero. "Mapa de Períodos Dominantes de la Vibración Ambiental de los Suelos Blandos del Valle de México". Geofísica Internacional, 32(1). (1991).

- [5] J. H. Steidl, A. G. Tumarkin y R. J. Archuleta R. J. "What is a reference site?" Bull. Seism. Soc. Am. 86(6): 1733-1748. (1996).

- [6] F. Coutel, y P. Mora. "Simulation-based comparison of four site-response estimation techniques". Bull. Seism. Soc. Am. 88(1): 30-42. (1998)

- [7] J. Lermo, y F.J. Chávez-García. "Are microtemors useful in site response evaluation?". Bulletin. Seism. Soc. Am. 84: 1350-1364. (1994).

- [8] J. G. Acosta Chang, C. Huerta López, L. H. Mendoza Garcilazo, A. Reyes Zamora. "Modelado de la respuesta sísmica en el subsuelo de la cd. de México, con registros a profundidad". Artículo. (1993). Geofísica Internacional, Vol 32, No. 1, pp. 131-152. (CESIA9302).
- [9] G. P. Villalobos Escobar. "Modelado teórico-computacional de la estructura del Hospital General de Mexicali posterior a obras de reforzamiento" Ensenada, B.C., México. Tesis de maestría. CICESE. (2008).
- [10] D. A. Pernia-Márquez. "Introducción a la medición de vibración". Mérida, Venezuela. Artículo. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes. (2004).
- [11] S. Wolf. "Guía para Mediciones Electrónicas y Prácticas de Laboratorio" Libro. ISBN 968-880-058-9
- [12] www.guralp.com/products/DM24S6DCM/. Consultado: 2 de noviembre de 2008.
- [13] www.kinemetrics.com/products.asp . Consultado :2 de noviembre de 2008.
- [14] <http://www.reftek.com/products.html>. Consultado: 2 de noviembre de 2008.
- [15] A. Pérez-Vertti Ramírez. "Sistema digitalizador de 24 bits para registro de señales sismológicas utilizando la tarjeta MSC1210". Ensenada, B.C., México. Tesis de maestría. UABC. (2007).

- [16] G. Vargas Hernández. "Diseño y construcción de un equipo para medición de vibración ambiental". Ensenada, B.C., México. Tesis licenciatura. UABC. (2004).

- [17] J. Travis and J. Kring. "LabVIEW for everyone" Third Edition. Libro. ISBN 0-13-185672-3. (2007).

- [18] MAXIM Filter design software. Versión 1.01. Consultado: enero de 2010.

- [19] MAXIM 8th-Order, Lowpass, Bessel, Switched-Capacitor filters.
MAX7401/MAX7405. 19-4788. Rev. 1; 6/99.

- [20] MAXIM 8th-Order, Lowpass, Butterworth, Switched-Capacitor filters.
MAX7480. 19-1416. Rev. 0; 1/99.

