



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS
PROVENIENTES DE LA UNIDAD SÍSMICA SR04

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

(ÁREA : ELECTRÓNICA)

P R E S E N T A :

DAVID TAPIA POZOS



DIRECTOR DE TESIS: M. I. LAURO SANTIAGO CRUZ

MÉXICO, D.F.

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A mi mamá María Antonia Pozos Piña q.e.p.d.

A mi hermana María Antonia Tapía Pozos por su apoyo incondicional durante mis
estudios.

A toda la familia de mi hermana, que durante de mis estudios se convirtió en mi
familia.

A mis hermanos por su apoyo moral y sus consejos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de realizar una carrera.

A la Facultad de Ingeniería y sus profesores por todas las enseñanzas durante mi formación como universitario.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por darme todas las facilidades para la realización de este proyecto.

Al M.I. Lauro Santiago Cruz por sus consejos, enseñanzas y sobre todo, por confiar en mí para la realización de este proyecto.

Al Dr. Jorge Aguirre González y al Ing. Horacio Mijares Arellano por su paciencia y asesoría durante este proyecto.

A mis compañeros del Laboratorio de Instrumentación por brindarme su amistad.

ÍNDICE

ÍNDICE	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	viii
PRÓLOGO	I
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema y propuesta de solución	1
2. GENERALIDADES	3
2.1. Microtremores y su estudio	3
2.1.1. Teoría de ondas	3
Ondas de cuerpo	3
Ondas superficiales	4
2.1.2. Microtremores	5
Fuentes de microtremores	6
Características de los microtremores	6
2.1.3. Métodos de análisis de microtremores	7
2.1.4. Método SPAC	9
Aspectos teóricos del método SPAC	9
Aplicación del método SPAC	11
2.2. Sistema de adquisición y registro de datos sísmicos	22
2.2.1. Sensores sísmicos	22
Sensores pasivos	23
Sensores activos	28
2.2.2. Amplificador	32
2.2.3. Conversor analógico a digital	32
Parámetros básicos de los conversores analógico a digital	33
Tipos de conversores analógico a digital	34
Aliasing	35
Filtro antialiasing	36
2.2.4. Referencia de tiempo	37
GPS	37
DCF77	38
2.2.5. Interfaz	39
Estándar RS232	39
2.2.6. Registrador de señales sísmicas	41
Almacenamiento de datos	41

Formato SAC	42
Variables del encabezado SAC	45
2.3. La instrumentación virtual	49
2.3.1. La programación gráfica en el entorno de LabVIEW	50
3. DESARROLLO DEL SISTEMA	51
3.1. Requerimientos generales	51
3.2. La unidad sísmica SR04	51
3.2.1. El geófono GS-11D	52
3.2.2. La tarjeta SADC20	53
Configuración del puerto	55
Decodificación de datos	55
Envío de comandos	57
3.2.3. La tarjeta GPSDCF	59
Instalación de la tarjeta como receptor-conversor	61
Instalación de la tarjeta como conversor	62
3.3. Desarrollo del software	62
3.3.1. Estructura del programa principal	62
3.3.2. Menú configuración	68
Directorio base	69
Administrador de canales	72
Salir	82
3.3.3. Menú adquisición	82
Modo prueba y modo registro	83
Detener	104
3.3.4. Menú lectura	105
3.3.5. Menú procesamiento	111
3.3.6. Menú acerca de	143
3.3.7. Distribución del programa	144
4. PRUEBAS AL SISTEMA	146
4.1. Pruebas realizadas al hardware	146
4.1.1. Prueba realizada a los sensores GS-11D	146
4.1.2. Pruebas realizadas a la tarjeta SADC20	147
4.1.3. Prueba realizada a la tarjeta GPSDCF	151
4.2. Pruebas realizadas al software	152
4.2.1. Prueba realizada en el laboratorio	152
4.2.2. Prueba realizada en campo	162
5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	169
5.1. Resultados	169
5.2. Conclusiones	170
5.3. Recomendaciones	171
BIBLIOGRAFÍA	172

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Modelo de propagación de las ondas P	3
Figura 2.2. Modelo de propagación de las ondas S	4
Figura 2.3. Modelo de propagación de las ondas Love	4
Figura 2.4. Modelo de propagación de las ondas Rayleigh	5
Figura 2.5. Algunas fuentes generadoras de microtemores	6
Figura 2.6. Microtemores de varios tipos de suelos y sus curvas de distribución de periodos	7
Figura 2.7. Disposición de los puntos de observación	9
Figura 2.8. Función Bessel de tipo uno y orden cero	10
Figura 2.9. Proceso de registro de microtemores	11
Figura 2.10. Ventanas en las que se dividen los registros de los microtemores	12
Figura 2.11. Espectros de potencia, espectros de potencia cruzados y coeficientes de autocorrelación para n ventanas	13
Figura 2.12. Gráfica que muestra los espectros de potencia para n ventanas	13
Figura 2.13. Gráficas de los coeficientes de autocorrelación para n ventanas	14
Figura 2.14. Gráfica del coeficiente de autocorrelación promediado	15
Figura 2.15. Interpolación del argumento de la función Bessel	16
Figura 2.16. Curva de dispersión de velocidad de fase	17
Figura 2.17. Curva de dispersión de velocidad de fase con límites empíricos	18
Figura 2.18. Modelo estratigráfico	19
Figura 2.19. Curva de dispersión de velocidad de fase	19
Figura 2.20. Relación de un modelo estratigráfico con una curva de dispersión	20
Figura 2.21. Curva teórica de ajuste	21
Figura 2.22. Estructura de velocidades	21
Figura 2.23. Sistema típico de adquisición y registro de datos sísmicos	22
Figura 2.24. Sensor mecánico vertical	24
Figura 2.25. Respuesta en frecuencia de un sensor mecánico	25
Figura 2.26. Sensor electromagnético	26
Figura 2.27. Restricción del movimiento vertical	27
Figura 2.28. Configuraciones típicas que utilizan el principio del péndulo	28
Figura 2.29. Acelerómetro de fuerza balanceada	29
Figura 2.30. Respuesta en frecuencia de un FBA	30
Figura 2.31. Sensor de velocidad de banda ancha	30
Figura 2.32. Respuesta en frecuencia de un sensor de velocidad de banda ancha	31
Figura 2.33. Circuito Típico para extender la respuesta de un sensor electromagnético	32
Figura 2.34. Proceso de conversión analógica a digital	33
Figura 2.35. Comparación de conversores analógico a digital	35
Figura 2.36. Señales con y sin aliasing	36
Figura 2.37. Espectro de una señal con y sin aliasing	36
Figura 2.38. Filtro antialiasing	37

Figura 2.39. Codificación de los datos de tiempo enviados por un transmisor DCF77	39
Figura 2.40. Conectores utilizados en el estándar RS232	40
Figura 2.41. Ejemplo de un panel frontal	50
Figura 2.42. Ejemplo de un diagrama de bloques	50

CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Unidad sísmica SR04	52
Figura 3.2. Geófono GS-11D	52
Figura 3.3. Curva de respuesta del geófono GS-11D	53
Figura 3.4. Tarjeta SADC20	54
Figura 3.5. Organización de los datos transmitidos por la SADC20	56
Figura 3.6. Tarjeta GPSDCF	59
Figura 3.7. Ventana principal del programa	63
Figura 3.8. Sección 1 del diagrama de bloques de la ventana principal	64
Figura 3.9. Concepto de cola	65
Figura 3.10. Sección 2 del diagrama de bloques de la ventana principal	66
Figura 3.11. Sección 3 del diagrama de bloques de la ventana principal	67
Figura 3.12. Sección 4 del diagrama de bloques de la ventana principal	68
Figura 3.13. Opciones del menú Configuración	69
Figura 3.14. Cuadro de diálogo para establecer el directorio base	69
Figura 3.15. Sección 1 del diagrama de bloques para establecer el directorio base	70
Figura 3.16. Sección 2 del diagrama de bloques para establecer el directorio base	71
Figura 3.17. Administrador de canales	72
Figura 3.18. Configuración del canal	73
Figura 3.19. SubVI que verifica las condiciones antes de abrir el Administrador de canales	75
Figura 3.20. Sección 1 del diagrama de bloques del Administrador de canales	76
Figura 3.21. Sección 2 del diagrama de bloques del Administrador de canales	77
Figura 3.22. Sección 1 del diagrama de bloques para configurar el canal	78
Figura 3.23. Verificación de errores antes de crear un canal	79
Figura 3.24. Creación de carpetas y archivos de un canal	80
Figura 3.25. SubVI para la creación de los archivos del ringbuffer	81
Figura 3.26. SubVI para crear un archivo del ringbuffer	81
Figura 3.27. SubVI para salir del programa	82
Figura 3.28. Opciones del menú Adquisición	83
Figura 3.29. Ventana principal durante la adquisición de datos	84
Figura 3.30. Copias de los VIs de adquisición y grabado	85
Figura 3.31. SubVI que verifica condiciones de error antes de la adquisición	86
Figura 3.32. Sección 1 del subVI que inicia la adquisición y el grabado de datos	88
Figura 3.33. SubVI que lee el contenido del archivo de configuración de un canal	88
Figura 3.34. Sección 2 del subVI que inicia la adquisición y el grabado de datos	89
Figura 3.35. Sección 3 del subVI que inicia la adquisición y el grabado de datos	90
Figura 3.36. Sección 4 del subVI que inicia la adquisición y el grabado de datos	90
Figura 3.37. VI de adquisición	91
Figura 3.38. SubVI para configurar el puerto	92
Figura 3.39. SubVI para establecer la frecuencia de muestreo	92

Figura 3.40. SubVI para leer un bloque correspondiente a un segundo de adquisición	93
Figura 3.41. SubVI para obtener la información del tiempo	93
Figura 3.42. SubVI para decodificar los datos de los canales de la unidad sísmica	94
Figura 3.43. Panel frontal del VI de grabado	95
Figura 3.44. Sección 1 del VI de grabado	96
Figura 3.45. Sección 2 del VI del grabado	97
Figura 3.46. Sección 1 del subVI “graba datos”	98
Figura 3.47. Creación de un archivo con formato SAC binario	99
Figura 3.48. SubVI para construir la ruta del archivo	99
Figura 3.49. SubVI para establecer algunos campos del encabezado SAC	100
Figura 3.50. SubVI para establecer valor de tipo flotante en el encabezado SAC	101
Figura 3.51. Escritura de datos a un archivo con formato SAC binario	102
Figura 3.52. Cierre de un archivo con formato SAC	103
Figura 3.53. Escritura de algunos campos del encabezado SAC antes de cerrar un archivo	103
Figura 3.54. SubVI para detener la adquisición de datos	104
Figura 3.55. Menú Lectura	105
Figura 3.56. Ventana para la lectura de archivos con formato SAC	105
Figura 3.57. Lectura de un archivo con formato SAC	106
Figura 3.58. Paleta gráfica	106
Figura 3.59. Opciones de zoom	107
Figura 3.60. Ventana para ver el encabezado de un archivo con formato SAC	108
Figura 3.61. Obtención de la ubicación inicial en el cuadro de diálogo	109
Figura 3.62. Diagrama de bloques para la lectura de un archivo con formato SAC	109
Figura 3.63. SubVI para mostrar el encabezado SAC	110
Figura 3.64. Menú Procesamiento	111
Figura 3.65. Paso 1 del asistente de procesamiento	112
Figura 3.66. Paso 2 del asistente de procesamiento	113
Figura 3.67. Paso 3 del asistente de procesamiento	114
Figura 3.68. Paso 4 del asistente de procesamiento	115
Figura 3.69. Paso 5 del asistente de procesamiento	116
Figura 3.70. Paso 6 del asistente de procesamiento	117
Figura 3.71. Paso 7 del asistente de procesamiento	118
Figura 3.72. Paso 8 del asistente de procesamiento	119
Figura 3.73. Tab control	120
Figura 3.74. Inicialización del asistente	121
Figura 3.75. Actualización de la leyenda de la página y de los botones Siguiente y Atrás	122
Figura 3.76. Transición a la página siguiente	123
Figura 3.77. Transición a la página anterior	125
Figura 3.78. Transición de la página Archivos de entrada a la página Dominio del tiempo	126
Figura 3.79. SubVI “lee archivo dat”	127
Figura 3.80. SubVI “lee archivo sac”	128
Figura 3.81. Transición de la página Dominio del tiempo a la página Parámetros SPAC	128
Figura 3.82. Transición de la página Parámetros SPAC a la página Espectros de	129

potencia	
Figura 3.83. Cálculo de los espectros de potencia y los coeficientes de autocorrelación	130
Figura 3.84. Cálculo del espectro de potencia	133
Figura 3.85. Cálculo de la parte real del espectro de potencia cruzado	133
Figura 3.86. Ventana de Parzen	134
Figura 3.87. Algoritmo para el suavizado con la ventana de Parzen	135
Figura 3.88. Genera ventana de Parzen	136
Figura 3.89. Suavizado de datos con la ventana de Parzen	136
Figura 3.90. Transición de la página Espectros de potencia a la página Coeficientes de autocorrelación	137
Figura 3.91. VI que grafica los coeficientes de autocorrelación	138
Figura 3.92. Transición de la página Coeficientes de autocorrelación a la página Coeficiente de autocorrelación promediado	139
Figura 3.93. SubVI para calcular el coeficiente de autocorrelación promediado	140
Figura 3.94. SubVI para el cálculo de la curva de velocidad de fase	141
Figura 3.95. Transición para finalizar el asistente de procesamiento	142
Figura 3.96. Menú Acerca de	143
Figura 3.97. Diagrama de bloques del menú acerca de	143
Figura 3.98. Asistente de instalación del programa	144
Figura 3.99. Accesos directos al programa	145

CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Señal del sensor 1	146
Figura 4.2. Señal del sensor 2	147
Figura 4.3. Señal del sensor 3	147
Figura 4.4. Diagrama para probar la sensibilidad de los ADCs de la tarjeta SADC20	148
Figura 4.5. Diagrama para probar la tarjeta SADC20 bajo una señal de entrada de AC	149
Figura 4.6. Señal senoidal registrada en el canal 1	149
Figura 4.7. Señal senoidal registrada en el canal 2	149
Figura 4.8. Señal senoidal registrada en el canal 3	150
Figura 4.9. Señal senoidal teórica generada	150
Figura 4.10. Comparación de la fecha y hora GMT	151
Figura 4.11. Instalación de las unidades sísmicas y las antenas de sus receptores GPS	152
Figura 4.12. Creación de directorio base “Prueba tres unidades”	153
Figura 4.13. Ubicación del directorio base y la carpeta “canales”	153
Figura 4.14. Canales creados mediante el Administrador de canales	154
Figura 4.15. Configuración del canal 1	154
Figura 4.16. Barra de desplazamiento para el modo ringbuffer	155
Figura 4.17. Carpetas de los canales y contenido de la carpeta del canal 1	156
Figura 4.18. Archivos del ringbuffer del canal 7	156
Figura 4.19. Adquisición y registro de los datos de los nueve canales configurados	157
Figura 4.20. Sistema Apsis durante la adquisición y el registro de datos	158
Figura 4.21. Contenido de las carpetas de registro de los canales 1 y 7	159
Figura 4.22. Lectura del primer archivo del canal 1	159
Figura 4.23. Encabezado SAC del primer archivo del canal 1	161
Figura 4.24. Instalación de los sensores sísmicos para la prueba en campo	162

Figura 4.25. Instalación de la unidad sísmica SR04	163
Figura 4.26. Imagen de las gráficas de los archivos de entrada en el dominio del tiempo	164
Figura 4.27. Imagen de la gráfica del espectro de potencia	164
Figura 4.28. Imagen del arreglo de gráficas de los coeficientes de autocorrelación	165
Figura 4.29. Imagen de la gráfica del coeficiente de autocorrelación promediado	166
Figura 4.30. Imagen de la gráfica de la curva de dispersión de velocidad de fase	166
Figura 4.31. Curvas teóricas generadas a partir de los modelos estratigráficos propuestos	168
Figura 4.32. Estructura de velocidades para el último modelo propuesto	168

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de las fuentes de ondas sísmicas según su origen	5
Tabla 2.2. Métodos de análisis de registros de microtemores	8
Tabla 2.3. Modelo estratigráfico que genera la mejor curva teórica de ajuste	20
Tabla 2.4. Frecuencias típicas generadas por diferentes fuentes sísmicas	23
Tabla 2.5. Función de algunas señales del estándar RS232	40
Tabla 2.6. Estructura del formato SAC binario	43
Tabla 2.7. Encabezado SAC binario	43
Tabla 2.8. Encabezado SAC alfanumérico	44
Tabla 2.9. Variables del encabezado SAC	45
Tabla 2.10. Tipos de datos del encabezado SAC	48
Tabla 2.11. Valores de los campos enumerados	48
Tabla 4.1. Modelo estratigráfico que genera la mejor curva teórica de ajuste	167

PRÓLOGO

El objetivo principal del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma México (UNAM) es contribuir al desarrollo del país por medio de la formación de recursos humanos y la generación de investigación y tecnología nacional. En el campo de la sismología y en la instrumentación se tiene una amplia experiencia, por lo que del trabajo conjunto de los especialistas en estas áreas se pueden obtener beneficios congruentes con el objetivo mencionado inicialmente.

El presente trabajo describe la manera en que se desarrolló un *software* destinado a facilitar la tarea de adquisición y procesamiento de los datos recolectados por una unidad sísmica. El propósito inicial del *software* es ayudar a los especialistas de ingeniería sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM a realizar pruebas de campo para determinar la estructura de las capas superficiales del suelo. Las características del *software* permiten ubicar la carpeta en donde se almacenarán los archivos resultado de la adquisición de datos; configurar varios canales para establecer parámetros como el número con el que se identificará el canal por configurar, el nombre del puerto de comunicaciones a donde está conectada o se conectará la unidad sísmica, el canal de la unidad sísmica del que se tomarán datos para registrarlos, la frecuencia de muestreo a la que se van a adquirir los datos, la manera en que se registrarán los datos adquiridos y la duración en minutos que tendrá cada archivo en donde se registrarán los datos; adquirir los datos de las unidades sísmicas conectadas al mismo tiempo que los grafica y los registra en archivos; realizar la lectura de los datos contenidos en los archivos registrados, graficarlos y visulizar de forma organizada el contenido del encabezado del archivo; y por último, procesar los datos contenidos en los archivos de datos por medio de un asistente que aplica paso a paso el método experimental utilizado por los especialistas en ingeniería sísmica. Cabe mencionar que la parte programada para las tareas de adquisición y registro de datos está estructurada de manera que este *software* pueda ser utilizado en diversos estudios de ingeniería sísmica, en donde se requiera adquirir datos simultáneamente de una o varias unidades sísmicas, con la ventaja de que los datos se registrarán en un formato de archivo de amplia difusión entre la comunidad científica especializada en sismología.

Este trabajo está conformado por cinco capítulos, cuyo contenido es el siguiente:

Capítulo 1. En este capítulo se da una breve introducción a los motivos de esta tesis, mencionando en principio el problema que se desea resolver para después pasar a la exposición de la propuesta de solución.

Capítulo 2. Aquí se comentan algunos conceptos necesarios para la comprensión de este trabajo. Primero se explica la teoría relacionada con las pruebas que hacen los especialistas en sismología para la determinación de las capas superficiales del suelo. Después se abordan algunos tópicos relativos a un sistema de adquisición de datos sísmicos, como son los sensores, los conversores analógico-digital, la referencia de tiempo, la computadora como medio para la adquisición de datos y el formato de archivo para el registro de datos.

Finalmente, se da un breve panorama de lo que es la instrumentación virtual y la programación en el ambiente de desarrollo LabVIEW.

Capítulo 3. Este capítulo constituye la parte central del trabajo de tesis, ya que trata del desarrollo de la solución al problema planteado. Primero se dan a conocer los requisitos de *hardware* y de *software* con los que debe cumplir el sistema. Posteriormente se explican los elementos de *hardware* que constituyen el sistema y la forma en que operan. Después se da paso a la explicación del *software* desarrollado, comentando con amplio detalle todos los paneles frontales de la aplicación, los diagramas de bloques que le dan funcionalidad y las ideas que se utilizaron. Al final se hace mención de la construcción de un programa de instalación con el objetivo de poder distribuir el *software* desarrollado.

Capítulo 4. Este capítulo trata acerca de las pruebas que se realizaron tanto al *hardware* como al *software* que integran el sistema. Para la parte de *hardware* las pruebas se reducen a evaluar la buena operación de los componentes de la unidad sísmica. Mientras que para la parte de *software* se explica una prueba de laboratorio y una prueba de campo con el propósito de conocer el desempeño del programa en condiciones reales.

Capítulo 5. Este es el último capítulo de este trabajo, por lo que aquí se proporcionan los resultados obtenidos a partir de su desarrollo, las conclusiones a las que se llegaron y algunas recomendaciones que pueden mejorar el programa desarrollado.

Finalmente se presenta la bibliografía consultada.

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se plantean los motivos de la tesis.

1.1. Antecedentes

La sismología es el estudio científico de las vibraciones mecánicas de la tierra. Dicho estudio se lleva a cabo mediante el análisis de datos contenidos en sismogramas, los cuales son grabaciones de vibraciones resultado de eventos naturales, como son: terremotos, erupciones volcánicas o explosiones hechas por el hombre. Tales fenómenos han atraído fuertemente la atención de la humanidad por siglos y aún en nuestro tiempo provocan sentimientos de miedo y misterio además de gran curiosidad intelectual.

El gran progreso hecho en sismología desde finales del siglo XIX -cuando los instrumentos llamados sismómetros fueron los primeros medios que pudieron grabar las vibraciones (ondas sísmicas) generadas por un terremoto al otro lado del mundo- ha sido estimulado principalmente por la disponibilidad de mejores datos, los cuales se espera mejorarán en futuras décadas. Los pasos más importantes en este progreso han sido iniciados por científicos con un buen entrenamiento en física y matemáticas.

Cada generación de sismólogos ha trabajado hacia la obtención de resultados cuantitativos, logrados en un inicio con calculadoras mecánicas y después con avanzados dispositivos digitales. De esta manera, combinando las mejoras en la instrumentación, nuestro entendimiento de la tierra, la teoría de ondas sísmicas y los cálculos, ha sido posible el manejo efectivo de gran cantidad de información contenida en los sismogramas.

Hoy la sismología tiene una amplia variedad de aplicaciones como la prospección mineral, la exploración de petróleo y gas natural y el diseño de construcciones resistentes a terremotos. Sin embargo, otros usos surgen generalmente de un amplio rango de problemas políticos, económicos y sociales, asociados con la reducción de daños sísmicos y la detección de explosiones nucleares.

1.2. Planteamiento del problema y propuesta de solución

En el Instituto de Ingeniería se siguen diferentes líneas de investigación para el estudio del movimiento terrestre, una de las cuales está enfocada al estudio de los microtemblores. La importancia de este estudio es que mediante el análisis de la información grabada de ruido ambiental es posible determinar condiciones y características específicas del suelo.

Una de las maneras en que se hace el estudio de los microtemblores es usando el método de autocorrelación espacial (SPAC: Spatial Autocorrelation). Para aplicar dicho método, en el terreno de estudio se colocan tres sensores sísmicos verticales, a una distancia

que puede variar desde 5 hasta 450 metros, formando un triángulo equilátero. Estos sensores se conectan a los tres canales analógicos de una tarjeta de adquisición de datos, la cual convierte las señales a datos digitales y las envía con su etiqueta de tiempo a una computadora a través del puerto serie.

Actualmente, para adquirir y procesar los datos enviados por la unidad sísmica, se hace uso de dos programas de diferentes desarrolladores de software. El programa para adquirir las señales guarda la información en archivos, en un formato propietario; mientras que el de procesamiento sólo acepta archivos en formato de texto, lo que hace necesario el uso de otro programa para realizar la conversión correspondiente. Así, con los archivos resultantes de la conversión se efectúa el procesamiento, usando dos programas en fortran para los cálculos y cuatro más en MATLAB para graficar los resultados.

A pesar de que los programas para el estudio han sido útiles, se ha planteado la necesidad de desarrollar un único software que simplifique tanto la tarea de adquisición como la de procesamiento y que englobe todas las herramientas necesarias para hacer el estudio de los microtemblores con el método SPAC. Así, para la adquisición de los datos se plantea que la forma de configurarla sea más simple y que los archivos se guarden en el formato llamado código de análisis sísmico (SAC: Seismic Analysis Code), el cual tiene más difusión entre la comunidad científica. Además, se desea que el procesamiento se lleve a cabo de una forma más dinámica, sin necesidad de estar usando varios programas y que se generen resultados rápidos y confiables para evaluar la utilidad de la información.

La manera en que se desarrollará el software será básicamente atacando las dos líneas ya mencionadas, adquisición y procesamiento. Para este desarrollo se utilizará el entorno gráfico para desarrollo de aplicaciones LabVIEW.

En la adquisición se hará uso de las herramientas disponibles en LabVIEW para la comunicación serial con la unidad sísmica y de las funciones de lectura y escritura binaria para el almacenamiento de los datos. También se aprovechará la gran facilidad con la que se pueden crear gráficas y ajustar sus escalas. Todas estas herramientas, además del manejo de programas multihilo, se utilizarán para maximizar las capacidades del software y poder adquirir y grabar datos de varias unidades sísmicas en forma casi paralela.

Por otro lado, en el procesamiento se aprovechará la capacidad de LabVIEW para manejar arreglos de datos grandes y la ventaja que ofrecen las librerías de procesamiento, en el dominio de la frecuencia, para realizar cálculos de espectros de potencia y espectros de potencia cruzados, los cuales están involucrados de manera importante en el método SPAC. Por último, se hará uso del potencial para generar graficas de múltiples trazos, arreglos bidimensionales de gráficas y la relativa facilidad para guardar dichas gráficas como imágenes en archivos.

Con base a los antecedentes presentados, en el capítulo 2 se procederá a realizar una revisión de las generalidades necesarias para la comprensión del presente trabajo.

2. GENERALIDADES

En este capítulo se dará una explicación general de los fundamentos del método SPAC. Además, se comentará acerca de los componentes principales de un sistema de adquisición y registro de datos sísmico. Esto con la finalidad de tener una mejor comprensión de los conceptos que se describirán en capítulos posteriores.

2.1. Microtremores y su estudio

En el estudio de las señales sísmicas es importante conocer las características de éstas y del procesamiento de las mismas, para obtener información que sea útil en el área de la ingeniería sísmica. Es por ello que haremos una revisión de los conceptos, características y métodos de análisis de microtremores, haciendo énfasis en el método SPAC, por ser éste el método de procesamiento de la información utilizado en el presente trabajo.

2.1.1. Teoría de ondas

Las ondas sísmicas son vibraciones que viajan a través de la tierra, originadas súbitamente por el fracturamiento de material rocoso debido a diversas fuentes. Las ondas sísmicas se dividen en dos categorías: las ondas de cuerpo y las ondas superficiales.

Ondas de cuerpo

Las ondas de cuerpo viajan en el interior de la tierra, siguiendo caminos curvos, debido a la densidad y composición variada del interior de la tierra. Éstas se clasifican en dos grupos: ondas primarias (P) y ondas secundarias (S).

Las ondas P son ondas longitudinales o de compresión, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación, como puede verse en la figura 2.1. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad 1.73 veces más rápido que las ondas S y se propagan a través de cualquier tipo de material.

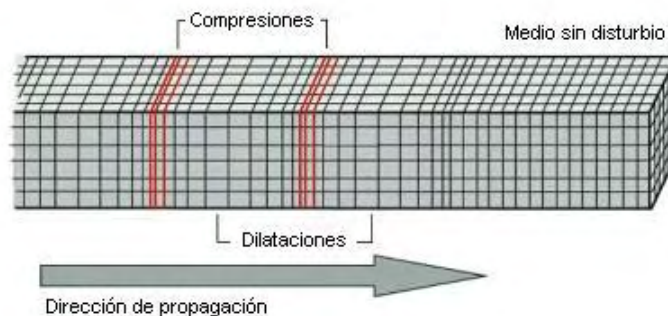


Figura 2.1. Modelo de propagación de las ondas P.

Las ondas S (o de cizalla) se producen cuando la energía pasa a través del medio moviendo las partículas en direcciones perpendiculares a la propagación. Son menos rápidas que las ondas P, por lo que aparecen en el terreno algo después que éstas. El modelo de este tipo de ondas puede observarse en la figura 2.2.

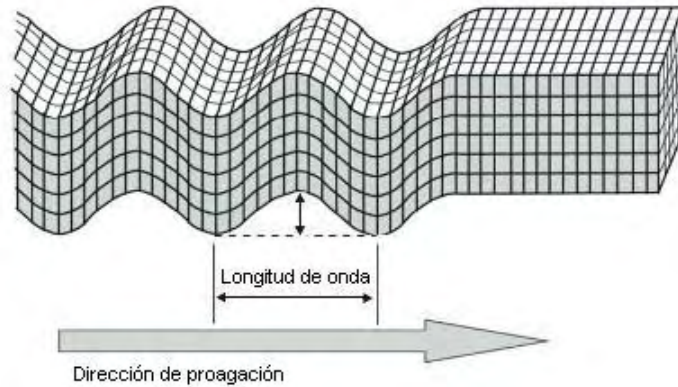


Figura 2.2. Modelo de propagación de las ondas S.

Ondas superficiales

Cuando las ondas de cuerpo llegan a la superficie, se generan las ondas superficiales, las cuales se propagan por la superficie de discontinuidad de la interfaz de la superficie terrestre (tierra-aire y tierra-agua). Debido a su baja frecuencia, las ondas superficiales provocan que las estructuras entren en resonancia con mayor facilidad que las ondas de cuerpo y son, por consiguiente, las ondas sísmicas más destructivas. Existen dos tipos de ondas superficiales, las ondas Love y las ondas Rayleigh.

Las ondas Love son aquéllas que presentan un movimiento horizontal de corte en la superficie. La velocidad de las ondas Love es un 90% de la velocidad de las ondas S y ligeramente superior a la velocidad de las ondas Rayleigh. En la figura 2.3 se puede observar el modelo de propagación de las ondas Love.

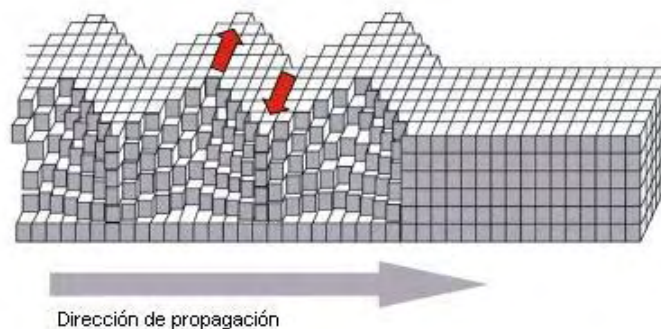


Figura 2.3. Modelo de propagación de las ondas Love.

Las ondas Rayleigh, también denominadas *ground roll*, presentan un movimiento elíptico retrógrado sobre el suelo; similar al de las ondas marinas. Son ondas más lentas que las ondas de cuerpo y su velocidad de propagación es casi un 70% de la velocidad de las ondas S. El modelo de propagación de este tipo de ondas se muestra en la figura 2.4.

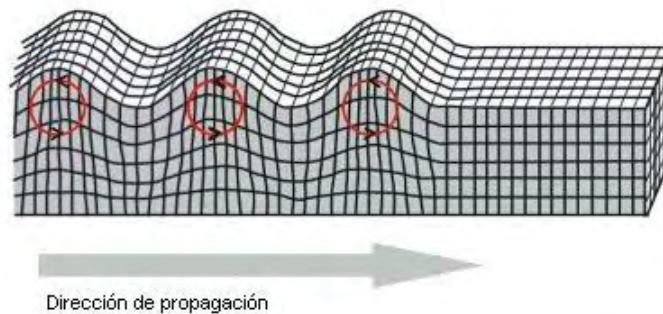


Figura 2.4. Modelo de propagación de las ondas Rayleigh.

Las ondas sísmicas superficiales provienen de diferentes fuentes, entre las cuales, según su origen, se tienen las presentadas en la tabla 2.1

Internas	Externas	Mixtas
Fallas sísmicas	Vientos, presión atmosférica	Erupciones volcánicas
Explosiones internas	Oleaje y mareas	Deslizamientos
Flujo hidrológico	Ruido cultural (tráfico y trenes)	Avalanchas
Movimientos del agua	Impacto de meteoros	
Explotación minera subterránea	Explotación minera superficial	

Tabla 2.1. Clasificación de las fuentes de ondas sísmicas según su origen.

2.1.2. Microtremores

Los microtremores, también llamados ruido ambiental, microtrepidaciones, microtemblores o ruido sísmico de fondo, son vibraciones aleatorias inducidas en las masas del suelo y roca por fuentes naturales o artificiales.

Estos comenzaron a estudiarse desde el siglo pasado para la caracterización de suelos y estructuras. Omori (1909) fue el pionero en realizar estos estudios empleando un péndulo inclinado y concluyó que existían vibraciones naturales en el suelo que no correspondían a las sísmicas o pulsaciones oscilatorias. Posteriormente, en los años cincuenta, aparecieron diversas metodologías lideradas por los japoneses sobre el origen y utilización de los microtremores para el estudio de las propiedades dinámicas del suelo. Actualmente, el desarrollo y mejora de estas metodologías ha permitido aplicarlas en estudios geotécnicos para la estimación de efectos de sitio y modelos de velocidad.

Fuentes de microtremores

Los microtremores sólo ocurren en el intervalo de frecuencias de 0.01 a 30 Hz, sin embargo, en la exploración geofísica superficial sólo interesa la banda de 0.1 a 10 Hz. Generalmente, los microtremores con frecuencias menores a 1 Hz son el resultado de fenómenos naturales como la acción de las olas, el viento, las variaciones atmosféricas y la actividad volcánica, entre otros; mientras aquellos con frecuencias mayores a 1 Hz son producidos por fuentes ligadas a la actividad humana, como el tráfico vehicular y/o trenes, el paso de peatones, maquinaria industrial, etc. En la figura 2.5 se presentan algunos ejemplos de las diferentes fuentes de microtremores.

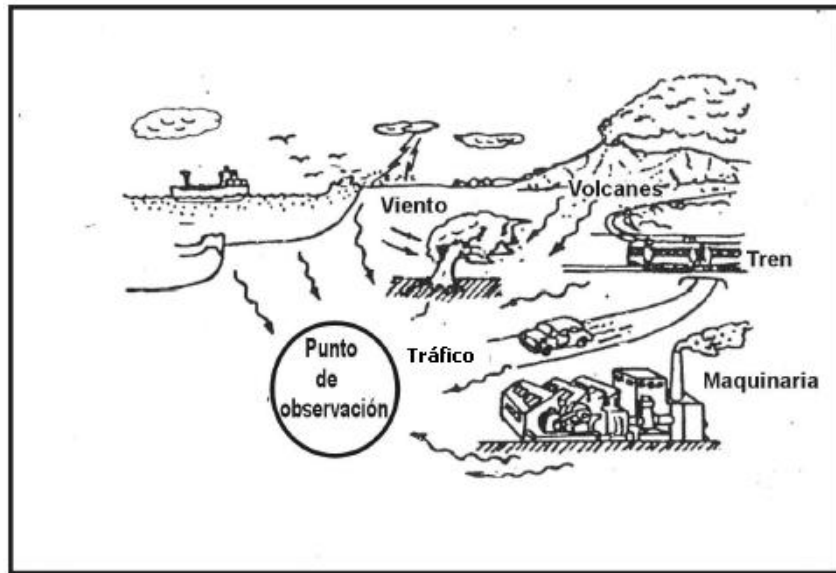


Figura 2.5. Algunas fuentes generadoras de microtremores.

Características de los microtremores

Entre las características principales de los microtremores destacan:

- Las amplitudes de los registros de microtremores obtenidos durante el día son entre 2 y 10 veces más grandes que aquéllos registrados durante la noche, lo que sugiere que las amplitudes de los microtremores son dependientes de la hora del día en que se realiza su medición y de las fuentes de vibración alrededor del punto de medición.
- Los microtremores se presentan en un rango de frecuencia entre 0.01 a 30 Hz, aunque la banda de interés está entre 0.1 a 10 Hz, es decir, en el cual la energía se transmite como ondas Rayleigh y cuyos modos y velocidades de propagación se pueden estimar con arreglos instrumentales.
- En general, las características espectrales de los microtremores pueden correlacionarse con las condiciones geológicas locales. Por ejemplo, los periodos

predominantes menores a 0.2 segundos son característicos de rocas duras, mientras que, periodos predominantes superiores a 0.2 segundos son típicos de depósitos más blandos. En la figura 2.6 se muestran ejemplos representativos de microtremores observados en varios tipos de suelos y que son actualmente usados en el código de edificación de Japón:

Tipo I: rocas y gravas arenosas duras del terciario.

Tipo II: gravas arenosas, arcillas arenosas duras y otros suelos de tipo aluvial gravoso con espesores de 5 metros o más.

Tipo III: suelo aluvial con espesor de 5 metros o más.

Tipo IV: suelo aluvial de depósitos deltaicos blandos, suelo superficial y limos con espesores de 30 metros o más.

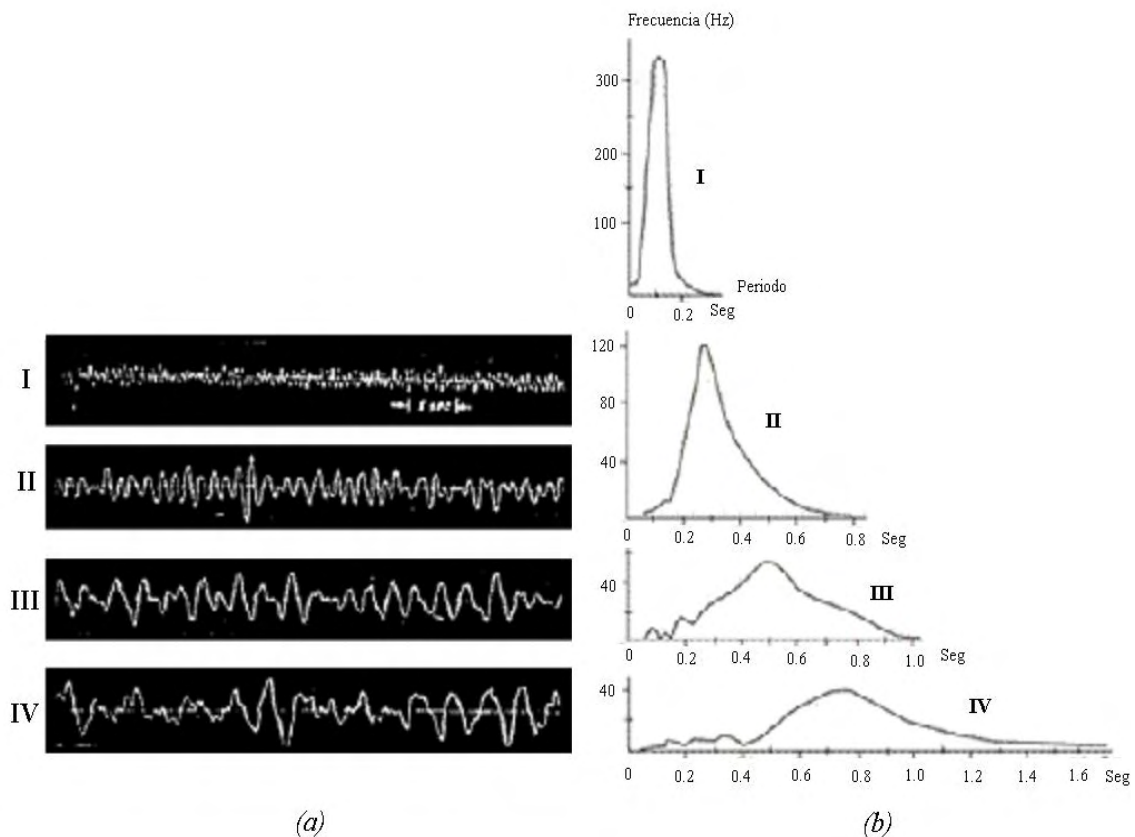


Figura 2.6. Microtremores de varios tipos de suelos y sus curvas de distribución de periodos.

2.1.3. Métodos de análisis de microtremores

Los métodos de análisis de microtremores también se conocen como métodos de ondas superficiales y, en general, se pueden dividir de la siguiente forma:

- Métodos pasivos: registran microtremores usando un arreglo instrumental bidimensional sobre la superficie, o bien un solo instrumento; puede ser con la

componente vertical o con las tres componentes de movimiento. El análisis de estos datos se puede realizar con métodos que permiten obtener las características de dispersión de las ondas superficiales. No requieren que se genere ninguna señal, como por ejemplo las producidas por las explosiones en la prospección sísmica.

- **Métodos activos:** registran las ondas Rayleigh inducidas por una fuente impulsiva o por una fuente oscilatoria con movimiento vertical armónico. En estos métodos los sensores verticales son ubicados en la superficie, en línea con la fuente, y la velocidad de fase se calcula a partir del análisis espectral. Son útiles para explorar profundidades de 10 a 20 metros, ya que para llegar a caracterizar profundidades mayores, se necesitaría una fuente muy grande.

Una clasificación de los principales métodos de análisis de microtremores se muestra en la tabla 2.2. En esta tabla se puede ver que sus diferencias están referidas al número de puntos de observación requeridos, al uso de una u otra componente de movimiento usada en el análisis y al tipo de resultado que se obtiene con cada método.

	Tipo	Número de puntos de observación	Componentes de movimiento usadas	Tipo de onda asumido	Resultado Óptimo
Métodos Pasivos	Espectral	1	Horizontal	Ondas S	Periodo Predominante
	Cocientes Espectrales	1-2	Horizontal Vertical	Ondas Rayleigh	Periodo natural del sitio
	Nakamura H/V	1	Horizontal Vertical	Ondas Rayleigh	Periodo natural del sitio
	Análisis Espectral F-K	7	Horizontal Vertical	Rayleigh y Love	Velocidad de fase: perfil de velocidades
	Autocorrelación Espacial SPAC	3-7	Horizontal Vertical	Rayleigh y Love	Velocidad de fase: perfil de velocidades
Métodos Activos	Análisis Espectral de Ondas de Superficie SASW	2 o más	Horizontal Vertical	Rayleigh y Love	Velocidad de fase: perfil de velocidades

Tabla 2.2. Métodos de análisis de registros de microtremores.

Para el procesamiento de las señales sísmicas, el método al que se hará referencia en este trabajo es el método pasivo SPAC, debido a que, como ya se mencionó en la introducción, es el utilizado en una línea de investigación en el Instituto de Ingeniería. Además, este método tiene la ventaja de que requiere del uso de un menor número de puntos de observación que los demás métodos pasivos, lo que se traduce en pruebas más económicas.

2.1.4. Método SPAC

Asumiendo que los microtremores contienen ondas superficiales, el sismólogo japonés Keiiti Aki propuso el método SPAC en 1957, con el propósito de obtener el modelo estructural del subsuelo (modelo de velocidad de las capas superficiales del terreno) a partir de registros simultáneos de microtremores. Para aplicar este método se requiere de un mínimo de tres estaciones, entendiéndose por estación cada uno de los puntos en que se observa o mide el movimiento.

Aspectos teóricos del método SPAC

El método SPAC consiste básicamente de lo siguiente, ver figura 2.7: con base en un punto de observación central $C(0,0)$, se colocan en este punto y en un arreglo circular de radio r y ángulo θ , un número dado de estaciones con el fin de observar los microtremores en los puntos del arreglo $C(0,0)$ y $X(r,\theta)$. Dichos microtremores se representan como ondas armónicas de la componente vertical $u(0,0,f,t)$ y $u(r,\theta,f,t)$, donde f corresponde a la frecuencia y t al tiempo.

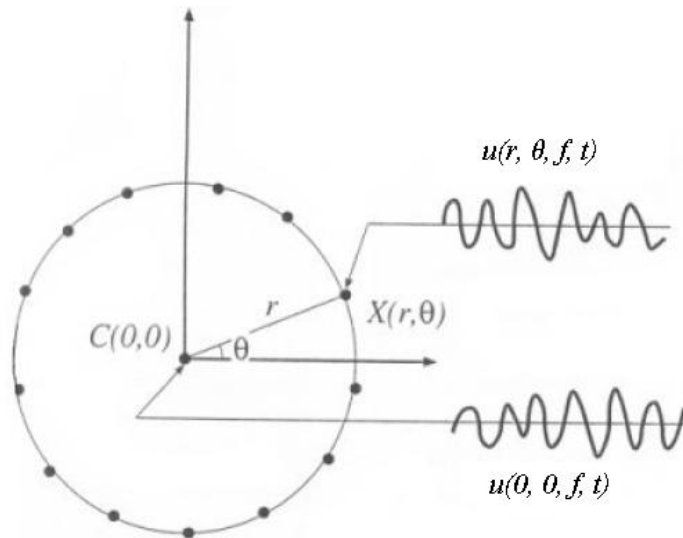


Figura 2.7. Disposición de los puntos de observación de microtremores.

Para obtener el modelo estructural del subsuelo se requiere determinar la función de autocorrelación espacial φ , la cual se define por el producto de las ondas armónicas de la componente vertical, representado por la siguiente ecuación:

$$\varphi(r, \theta, f) = \overline{u(0,0, f, t) \cdot u(r, \theta, f, t)} \quad (2.1)$$

donde la barra representa el valor promedio de la forma de onda en el dominio del tiempo.

Con base en el promedio de la función de autocorrelación φ en todas las direcciones del arreglo circular, se puede determinar lo que se define como coeficiente de autocorrelación espacial ρ , mediante la siguiente ecuación:

$$\rho(r, f) = \frac{1}{2\pi \cdot \varphi(0,0, f)} \int_0^{2\pi} \varphi(r, \theta, f) d\theta \quad (2.2)$$

donde $\varphi(0,0,f)$ es la función de autocorrelación espacial en el centro $C(0,0)$ del arreglo circular.

A partir de la solución de la ecuación (2.2) se tiene que:

$$\rho(r, f) = J_0(x) = J_0\left(\frac{2\pi fr}{c(f)}\right) \quad (2.3)$$

donde $J_0(x)$ es la función Bessel de tipo uno y de orden cero (figura 2.8) y $c(f)$ es la velocidad de fase a la frecuencia f .

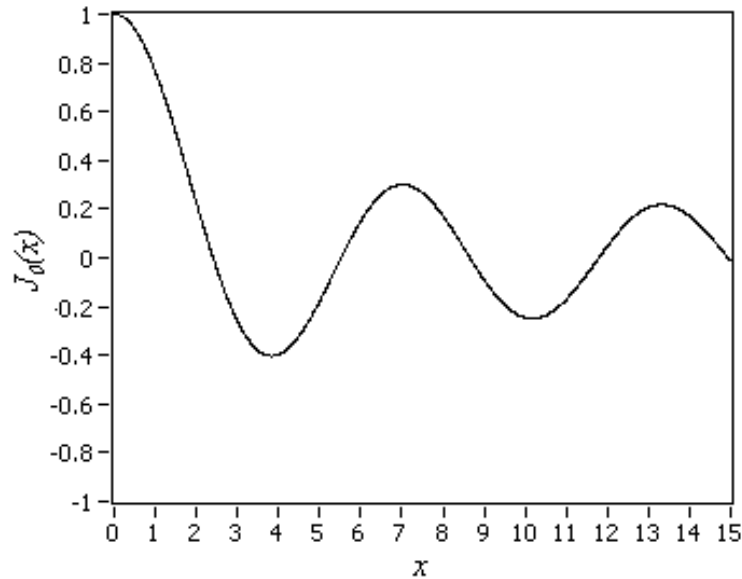


Figura 2.8. Función Bessel de tipo uno y orden cero.

El coeficiente de autocorrelación espacial $\rho(r,f)$ también puede calcularse directamente en el dominio de la frecuencia, utilizando para ello la siguiente ecuación:

$$\rho(r, f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Re[S_{CX}(f, r, \theta)]}{\sqrt{S_C(f) \cdot S_X(f, r, \theta)}} d\theta \quad (2.4)$$

donde $Re[S_{CX}(f,r,\theta)]$ es la parte real del espectro de potencia cruzado de los microtremores entre los puntos C y X , y $S_C(f)$ y $S_X(f,r,\theta)$ son los espectros de potencia de los microtremores

en los puntos C y X , respectivamente. Tanto los espectros de potencia como los espectros de potencia cruzados se pueden obtener a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT : Fast Fourier Transform).

Igualando los argumentos de las funciones Bessel de la ecuación 2.3 y despejando la velocidad de fase $c(f)$ se tiene la siguiente ecuación:

$$c(f) = \frac{2\pi fr}{x} \quad (2.5)$$

Para evaluar la ecuación 2.5 se conoce r de las dimensiones del arreglo, pero se desconoce el conjunto de valores f y x . Algunos pasos previos para conocerlos son: calcular el coeficiente de autocorrelación espacial, con la ecuación 2.4, para obtener un conjunto de valores ρ contra f y generar una función Bessel de tipo uno y orden cero, para obtener un conjunto de valores J_0 contra x . Para conocer el primer valor de f y de x , del conjunto de valores ρ contra f se toma el primer valor de f y su respectivo ρ . Para ese valor de ρ se busca en el conjunto de valores J_0 contra x , el valor de J_0 que más se le parezca y se toma su correspondiente valor de x . La operación realizada anteriormente se repite hasta obtener la totalidad del conjunto de valores f y x .

Finalmente, graficando el conjunto de valores de $c(f)$ se obtiene una curva de dispersión de velocidad de fase, a la cual se le aplica una inversión para estimar la estructura de velocidades de las capas superficiales del terreno.

Aplicación del método SPAC

En el terreno de la aplicación experimental del método, se colocan tres sensores sísmicos verticales en los vértices de un triángulo equilátero, cuya longitud por lado puede variar desde 5 y hasta 450 metros. Estos sensores envían las señales de los microtremores a una tarjeta digitalizadora, que a su vez manda las señales digitalizadas a una computadora portátil donde se hace el registro. En la figura 2.9 se puede ver un diagrama de bloques del proceso anterior.

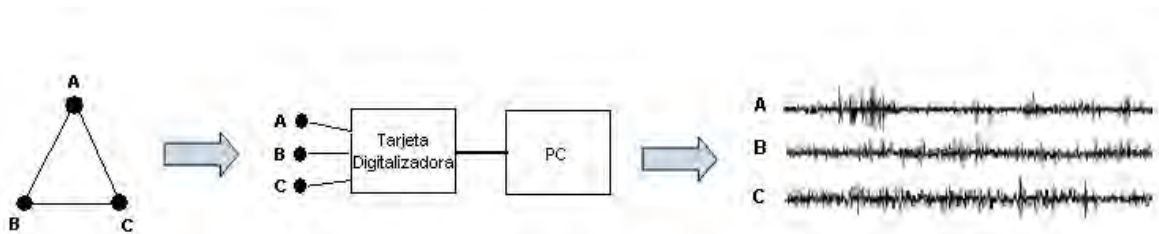


Figura 2.9. Proceso de registro de microtremores.

Los registros de los microtremores de las estaciones A, B y C, en la PC, se dividen en n bloques, como se ilustra en la figura 2.10. A cada bloque se le denomina ventana, que en la figura están representadas por los números $1, 2, \dots, n$, por lo cual se tendrían las ventanas A_1, A_2, \dots, A_n ; B_1, B_2, \dots, B_n y C_1, C_2, \dots, C_n .

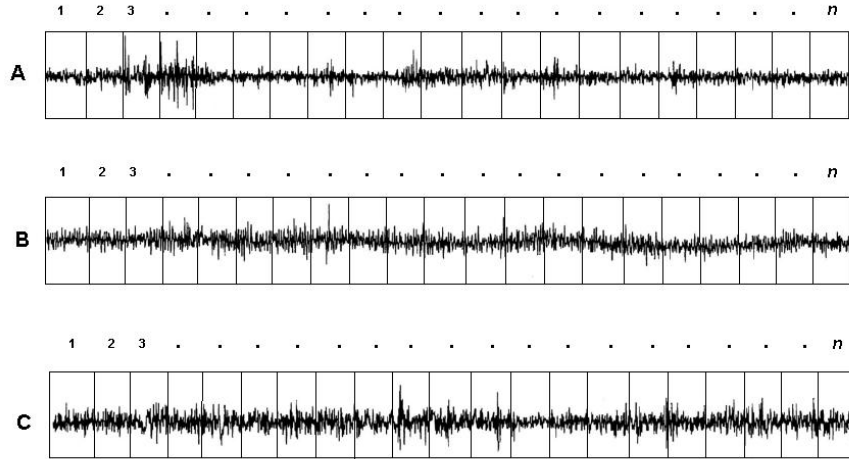


Figura 2.10. Ventanas en las que se dividen los registros de los microtremores.

Con base en los datos de la primer ventana de las tres estaciones, se calculan los espectros de potencia S_{AI} , S_{BI} , S_{CI} y los espectros de potencia cruzados S_{ABI} , S_{ACI} , S_{BAI} , S_{BCI} , S_{CAI} , S_{CBI} , utilizando las siguientes ecuaciones:

$$S_A(f) = \frac{FFT(A) \times FFT^*(A)}{N^2} \quad (2.6)$$

$$S_{AB}(f) = \frac{FFT(A) \times FFT^*(B)}{N^2} \quad (2.7)$$

donde N es el número de datos que hay en la ventana y FFT^* es el valor conjugado de la FFT .

Con los datos de los espectros de potencia y las espectros de potencia cruzados de la primer ventana, se calculan los coeficientes de autocorrelación ρ_{OA} , ρ_{OB} , ρ_{OC} usando las ecuaciones (2.8), (2.9) y (2.10), respectivamente. Estas tres ecuaciones son la aplicación de la ecuación (2.4) para tres estaciones.

$$\rho_{OA}(f) = \frac{1}{2} \left[\frac{Re[S_{AB}(f)]}{\sqrt{S_A(f) \times S_B(f)}} + \frac{Re[S_{AC}(f)]}{\sqrt{S_A(f) \times S_C(f)}} \right] \quad (2.8)$$

$$\rho_{OB}(f) = \frac{1}{2} \left[\frac{Re[S_{BA}(f)]}{\sqrt{S_B(f) \times S_A(f)}} + \frac{Re[S_{BC}(f)]}{\sqrt{S_B(f) \times S_C(f)}} \right] \quad (2.9)$$

$$\rho_{OC}(f) = \frac{1}{2} \left[\frac{Re[S_{CA}(f)]}{\sqrt{S_C(f) \times S_A(f)}} + \frac{Re[S_{CB}(f)]}{\sqrt{S_C(f) \times S_B(f)}} \right] \quad (2.10)$$

El procedimiento de la primer ventana se aplica a las n ventanas en las que se dividieron los registros, resultando un conjunto de datos como los que se muestran en la figura 2.11.

S_{A1}	S_{A2}	S_{A3}	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	S_{An}
S_{B1}	S_{B2}	S_{B3}	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	S_{Bn}
S_{C1}	S_{C2}	S_{C3}	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	S_{Cn}
S_{AB1}	S_{AB2}	S_{AB3}	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	S_{ABn}
S_{AC1}	S_{AC2}	S_{AC3}	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	S_{ACn}
S_{BA1}	S_{BA2}	S_{BA3}	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	S_{BAn}
S_{BC1}	S_{BC2}	S_{BC3}	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	S_{BCn}
S_{CA1}	S_{CA2}	S_{CA3}	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	S_{CAN}
S_{CB1}	S_{CB2}	S_{CB3}	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	S_{CBn}

ρ_{OA1}	ρ_{OA2}	ρ_{OA3}	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	ρ_{OAn}
ρ_{OB1}	ρ_{OB2}	ρ_{OB3}	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	ρ_{OBn}
ρ_{OC1}	ρ_{OC2}	ρ_{OC3}	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	ρ_{OCn}

Figura 2.11. Espectros de potencia, espectros de potencia cruzados y coeficientes de autocorrelación para n ventanas.

Ejemplos de las gráficas de los espectros de potencia y los coeficientes de autocorrelación, para las n ventanas, pueden verse en las figuras 2.12 y 2.13, respectivamente.

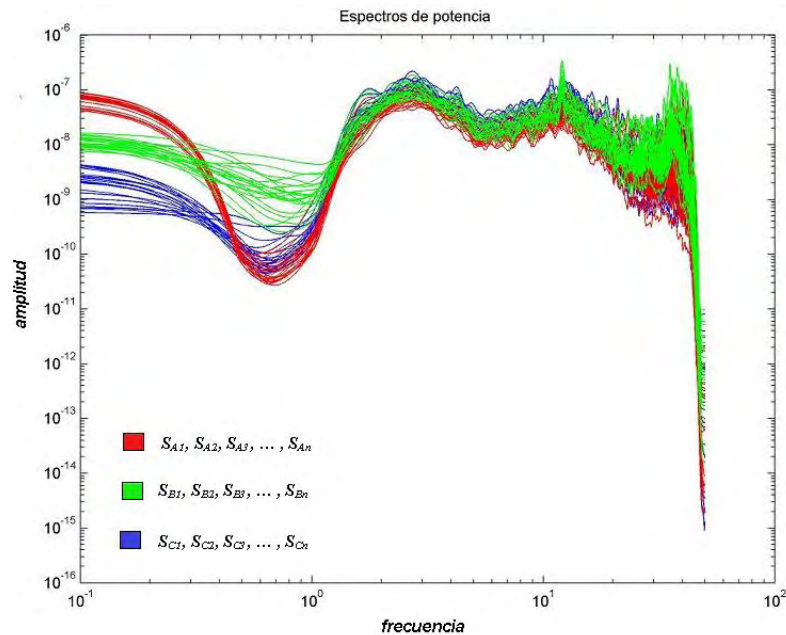
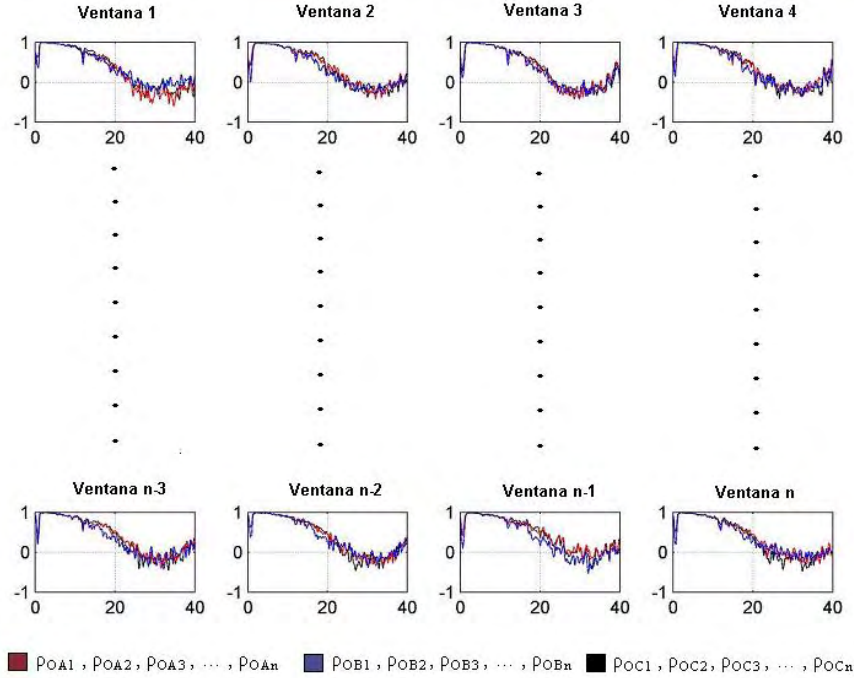


Figura 2.12. Gráfica que muestra los espectros de potencia para n ventanas.



2.13. Gráficas de los coeficientes de autocorrelación para n ventanas.

De las gráficas de los coeficientes de autocorrelación para n ventanas, mostradas en la figura 2.13, se seleccionan las ventanas que cumplan con las siguientes características: que tengan mayor parecido a una función Bessel de orden cero, sus cruces por cero estén en el mismo rango de frecuencias y tengan mayor similitud entre ellas. Una vez realizado lo anterior, se hace un promedio con los datos de los coeficientes de autocorrelación de las ventanas seleccionadas. Por ejemplo, si se seleccionaron las ventanas 1, 3, 4, 5, 8, $n-2$, $n-1$, n , el promedio se obtendría de la siguiente forma:

$$\rho_{OA} = \frac{\rho_{OA1} + \rho_{OA3} + \rho_{OA5} + \rho_{OA8} + \rho_{OAn-2} + \rho_{OAn-1} + \rho_{OAn}}{M} \quad (2.11)$$

$$\rho_{OB} = \frac{\rho_{OB1} + \rho_{OB3} + \rho_{OB5} + \rho_{OB8} + \rho_{OBn-2} + \rho_{OBn-1} + \rho_{OBn}}{M} \quad (2.12)$$

$$\rho_{OC} = \frac{\rho_{OC1} + \rho_{OC3} + \rho_{OC5} + \rho_{OC8} + \rho_{OCn-2} + \rho_{OCn-1} + \rho_{OCn}}{M} \quad (2.13)$$

donde M es el número de ventanas seleccionadas y para el ejemplo planteado es igual a 7.

Con los coeficientes de autocorrelación promediados obtenidos (ρ_{OA} , ρ_{OB} , ρ_{OC}), se realiza un promedio para obtener un solo coeficiente de autocorrelación promediado $\rho(f,r)$. Este promedio se obtiene de la siguiente forma:

$$\rho(f,r) = \frac{\rho_{OA} + \rho_{OB} + \rho_{OC}}{3} \quad (2.14)$$

En la figura 2.14 se puede observar un ejemplo de una gráfica del coeficiente de autocorrelación promediado $\rho(f,r)$.

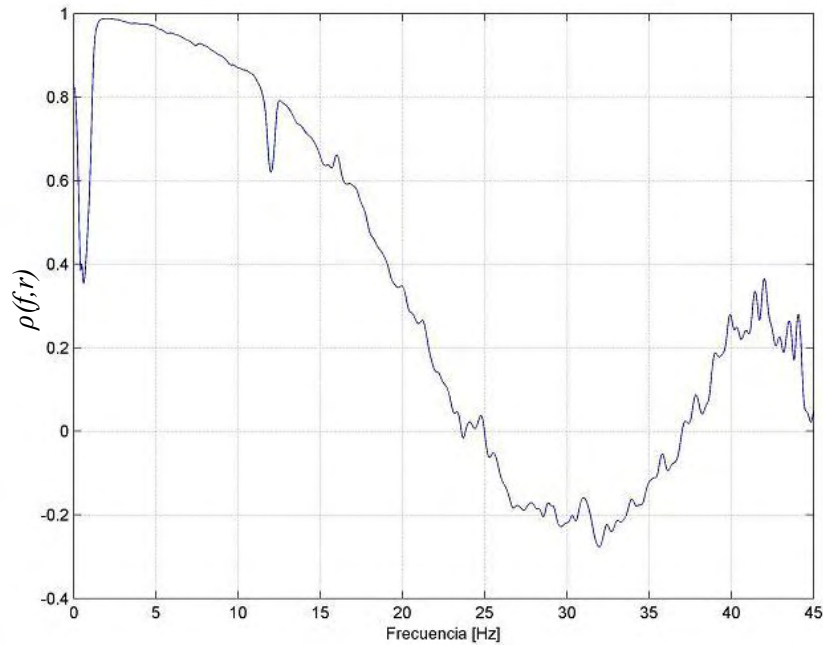


Figura 2.14. Gráfica del coeficiente de autocorrelación promediado.

Ya que se tiene $\rho(f,r)$, de la ecuación 2.3, se puede interpolar el argumento de la función Bessel para determinar la velocidad de fase $c(f)$. La manera en que esto se hace se describe mediante el siguiente ejemplo:

Para un arreglo triangular de 5 metros de lado, supóngase que se tiene un conjunto de datos a partir de los cuales es posible graficar una función Bessel de tipo uno y orden cero y se tiene el conjunto de datos del coeficiente de autocorrelación promediado, como se muestra a continuación.

x	$J_0(x)$	f	$\rho(f,r=5)$
0.00	1.000000	0.000000	0.805328
0.01	0.999975	0.012207	0.796665
0.02	0.999900	0.024414	0.787667
0.03	0.999775	0.036621	0.778317
0.04	0.999600	0.048828	0.768601
0.05	0.999100	0.061035	0.758505
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
0.91	0.803446	.	.
0.92	0.799334	.	.
0.93	0.795186	.	.

Del conjunto de datos del coeficiente de autocorrelación promediado se toma un valor. Después, en el conjunto de datos de la función Bessel se busca un par de valores entre los que esté el valor tomado del conjunto de datos del coeficiente de autocorrelación promediado. Así, para el conjunto de datos mostrados anteriormente, si se toma el valor del coeficiente de autocorrelación promediado $\rho(0.012207)=0.796665$, el par de valores del conjunto de datos de la función Bessel entre los que está este valor son $J_0(0.92)=0.799334$ y $J_0(0.93)=0.795186$. Luego, se asume que el par de valores del conjunto de datos de la función Bessel son dos puntos dados de una recta, de manera que el primer valor corresponde al punto $P_1(x_1, y_1)=P_1(0.92, 0.799334)$ y el segundo valor corresponde al punto $P_2(x_2, y_2)=P_2(0.93, 0.795186)$. Del mismo modo, se asume que el valor tomado del coeficiente de autocorrelación promediado pertenece a la recta, de manera que este valor corresponde al punto $P(x, y)=(x, 0.796665)$. La representación de los puntos descritos anteriormente se puede ver en la gráfica de la figura 2.15.

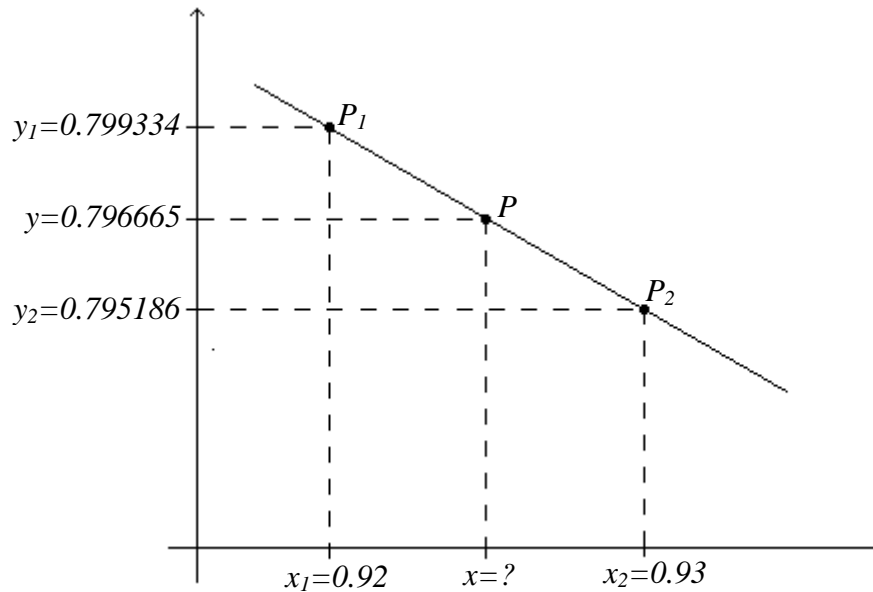


Figura 2.15. Interpolación del argumento de la función Bessel.

El valor de x del punto $P(x, y)$ mostrado en la figura 2.15 se puede interpolar utilizando la ecuación de la recta dados dos puntos:

$$x = x_1 + (x_2 - x_1) \frac{(y - y_1)}{(y_2 - y_1)} \tag{2.15}$$

Sustituyendo los valores conocidos de los puntos P , P_1 y P_2 en la ecuación 2.15 se tiene que:

$$x = 0.92 + (0.93 - 0.92) \frac{(0.796665 - 0.799334)}{(0.795186 - 0.799334)} = 0.926434$$

Sustituyendo en la ecuación 2.5 el valor interpolado de $x=0.926434$, la frecuencia $f=0.012207$, correspondiente al valor tomado del coeficiente de autocorrelación promediado, y la distancia entre las estaciones del arreglo $r=5\text{m}$, se calcula uno de los valores de la velocidad de fase:

$$c(0.12207) = \frac{2\pi \times 0.012207 \times 5}{0.926434} = 0.413946$$

Para obtener el conjunto de datos de la velocidad de fase a varias frecuencias, se aplica el procedimiento descrito en el ejemplo anterior a todo el conjunto de valores del coeficiente de autocorrelación promediado. En la figura 2.16 se puede observar un ejemplo de la gráfica de velocidad de fase.

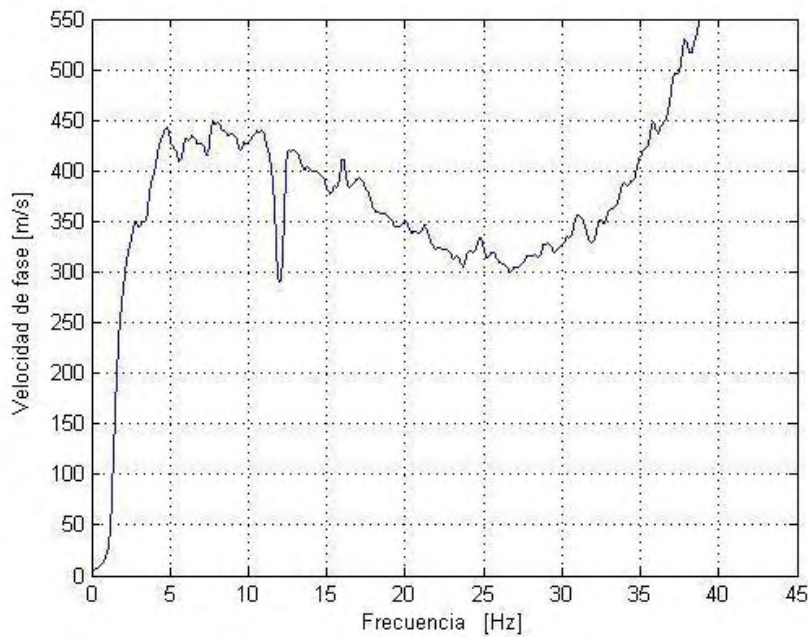


Figura 2.16. Curva de dispersión de velocidad de fase.

A la gráfica anterior se le agregan dos líneas rectas, como se muestra en la figura 2.17. Estas líneas corresponden a los límites semi-empíricos de confiabilidad, definidos en 1996 por el sismólogo Ken Miyakoshi. El límite superior C_S y el límite inferior C_I se definen como:

$$C_S = 10 \cdot r \cdot f \tag{2.16}$$

$$C_I = 2 \cdot r \cdot f \tag{2.17}$$

donde r es la distancia entre estaciones y f es la frecuencia.

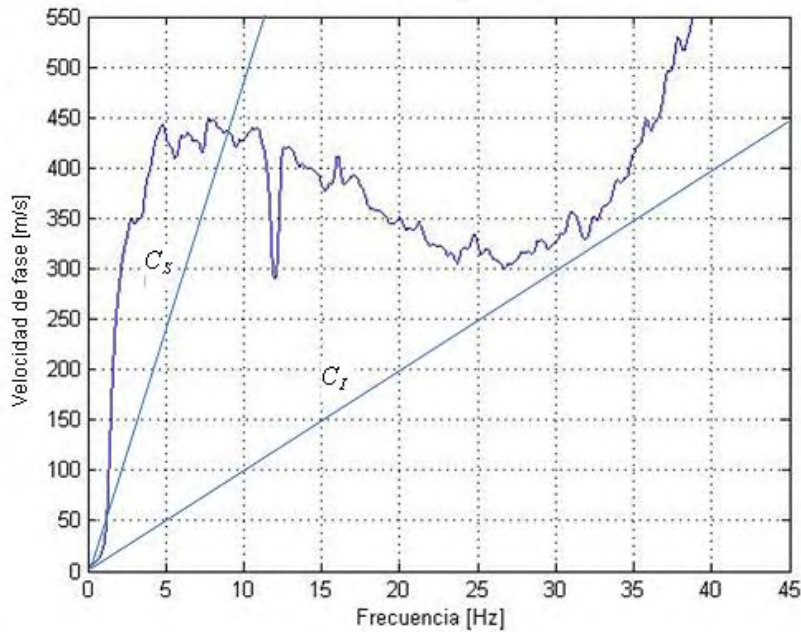


Figura 2.17. Curva de dispersión de velocidad de fase con límites empíricos.

La curva de dispersión de velocidad de fase muestra que la velocidad de propagación de las ondas sísmicas a través de los estratos de la tierra varía en función de la frecuencia, esto debido a la variación de las propiedades dinámicas del suelo con la profundidad. Lo anterior se puede ilustrar con el siguiente ejemplo:

Suponiendo que se tiene un modelo estratigráfico compuesto por los siguientes parámetros: un estrato de espesor H que contiene cierto material con una densidad ρ_1 , en donde las ondas S viajan a una velocidad β_1 y las ondas P viajan a una velocidad α_1 , y un segundo estrato que contiene cierto material con una densidad ρ_2 , en donde las ondas S viajan a una velocidad β_2 y las ondas P viajan a una velocidad α_2 . La figura 2.18 muestra la disposición de los estratos mencionados en el modelo estratigráfico.

La velocidad de fase de las ondas S cuando pasan del primer estrato al segundo estrato tiene un comportamiento como el mostrado en la figura 2.19, en donde la velocidad de fase disminuye conforme la frecuencia aumenta. La velocidad de fase (c) de las ondas S está vinculada con la longitud de onda (λ) y la frecuencia (f) mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2.18}$$

Tomando algunos segmentos de la curva de la figura 2.19, para evaluar la ecuación anterior, se pueden estimar algunos valores de λ y establecer una relación entre esta curva y los estratos mostrados en la figura 2.18. Para el primer segmento plano de la curva se tienen valores pequeños de f y valores grandes de c , lo que implica que se tendrán valores grandes de λ (ondas más largas en la figura 2.18), que estarán asociados con el segundo estrato,

donde la velocidad de las ondas S es β_2 . Para el segundo segmento plano de la curva se tienen valores grandes de f y valores chicos de c , lo que implica que se tendrán valores chicos de λ (ondas más cortas en la figura 2.18), que estarán asociados con el primer estrato, donde la velocidad de las ondas S es β_1 . El segmento de la curva en donde hay un quiebre indica la presencia de estratos con diferentes propiedades y dependiendo de la ubicación del quiebre, el primer estrato tendrá un determinado espesor H , de manera que, si el quiebre se desplaza hacia la izquierda el espesor aumenta y si el quiebre se desplaza hacia la derecha el espesor disminuye.

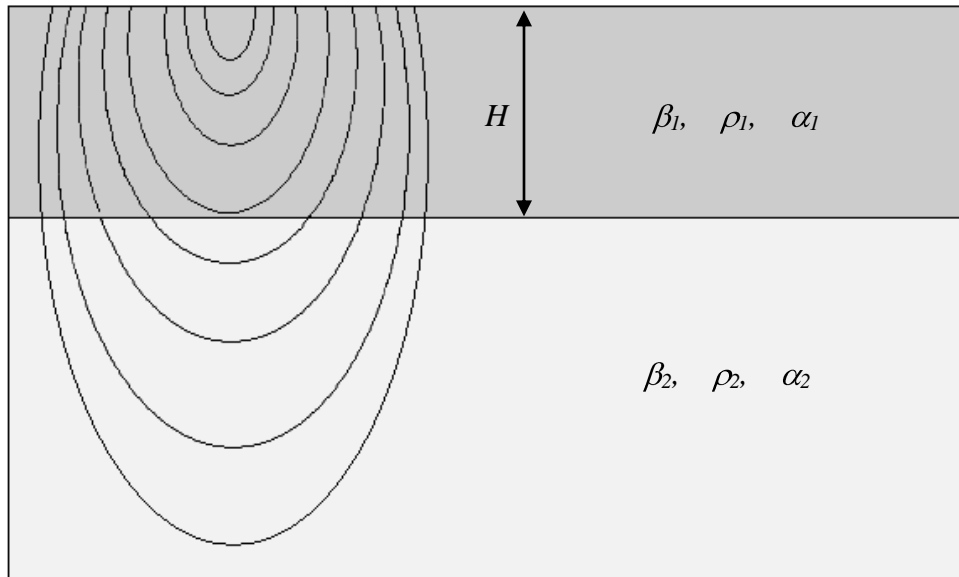


Figura 2.18. Modelo estratigráfico.

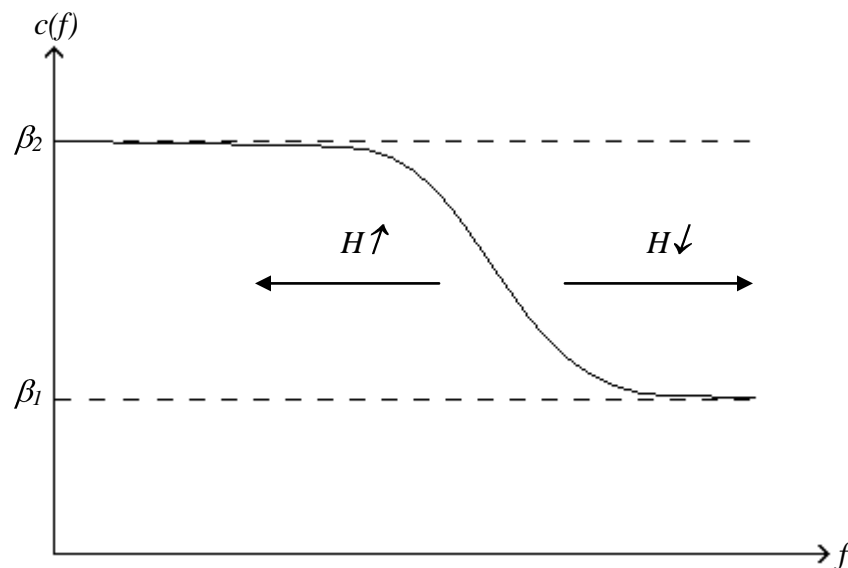


Figura 2.19. Curva de dispersión de velocidad de fase.

Entonces si se tuvieran, por decir, cinco estratos, el comportamiento esperado de la curva de dispersión de velocidad de fase sería algo como lo que se presenta en la figura 2.20.

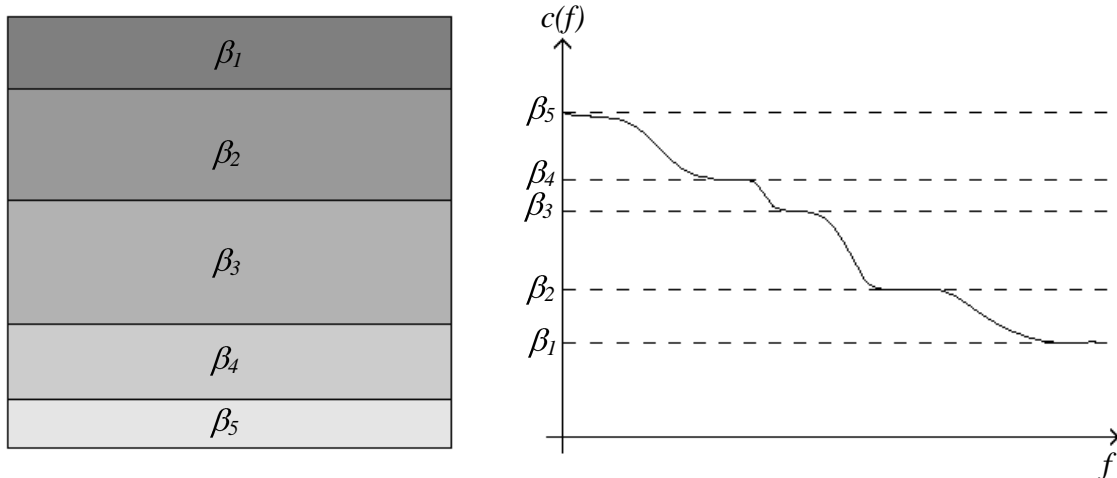


Figura 2.20. Relación de un modelo estratigráfico con una curva de dispersión.

A partir de los ejemplos anteriores, se puede ver que los cambios abruptos en la velocidad de las ondas sísmicas permiten determinar los estratos hallados en la tierra.

Regresando a la curva de dispersión de velocidad de fase de la figura 2.17, para conocer su relación con las propiedades de los estratos se toman algunos puntos de ésta y se propone un modelo estratigráfico para que, mediante un método numérico, se genere una curva teórica que se ajuste al segmento de la curva de dispersión que se encuentra dentro de los límites semi-empíricos de confiabilidad. Este proceso es de prueba y error, por lo que si la curva teórica generada no se ajusta a la curva de dispersión, se modifican los parámetros del modelo estratigráfico propuesto hasta que la curva teórica se ajuste.

Para la curva de dispersión de velocidad de fase de la figura 2.17, el modelo estratigráfico que genera la mejor curva teórica de ajuste es el que se presenta en la tabla 2.3. En la figura 2.21 se muestra el segmento de la curva de dispersión que se encuentra dentro de los límites semi-empíricos de confiabilidad y la curva teórica generada a partir del modelo estratigráfico.

	Espesor [m]	Densidad [ton/m ³]	Vs [m/s]	Vp [m/s]
Estrato 1	6.8	1.6	300	740
Estrato 2	-	1.8	500	1060

Tabla 2.3. Modelo estratigráfico que genera la mejor curva teórica de ajuste.

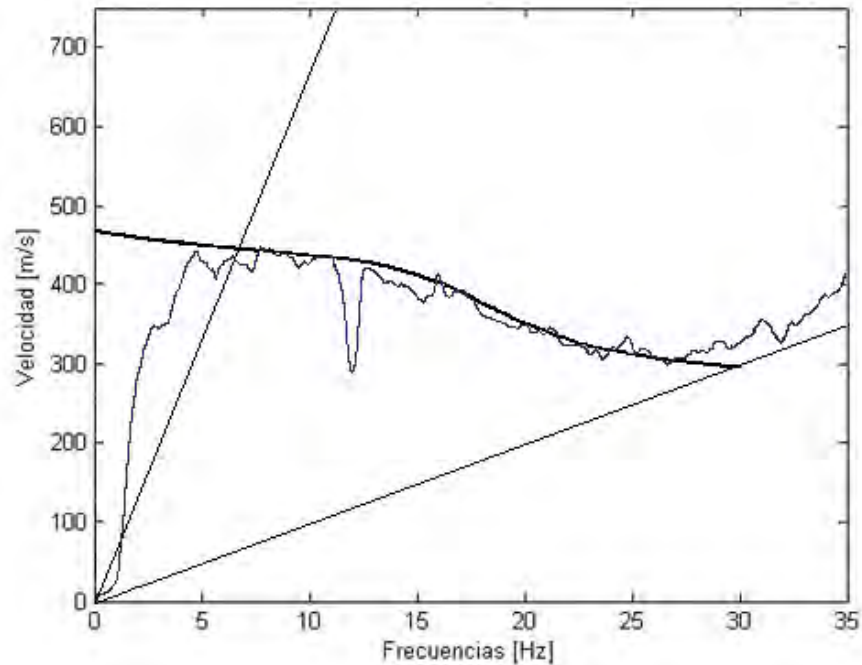


Figura 2.21. Curva teórica de ajuste.

Finalmente, de la tabla 2.3 se toma el espesor de los estratos y la velocidad de las ondas S y P, para obtener la estructura de velocidades en función de la profundidad (ver figura 2.22).

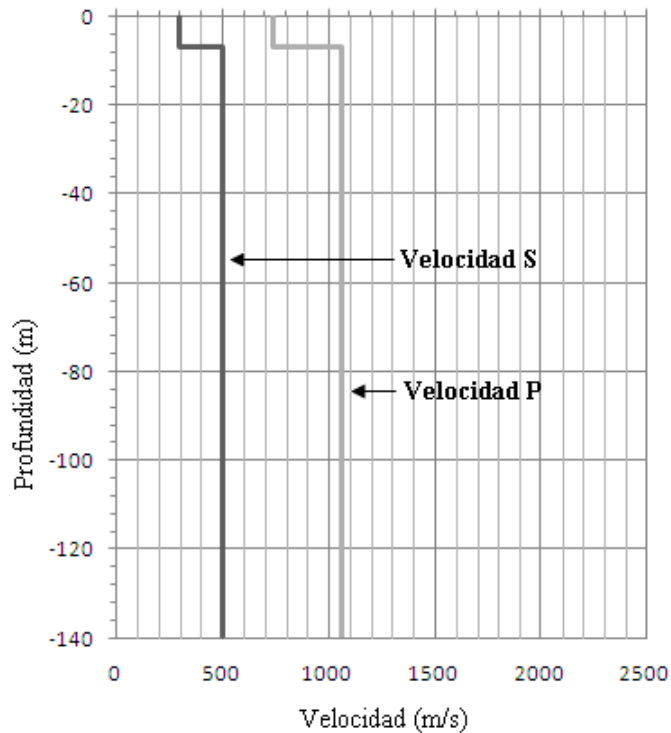


Figura 2.22. Estructura de velocidades.

2.2. Sistema de adquisición y registro de datos sísmicos

Un sistema típico de adquisición y registro de datos sísmicos está básicamente compuesto por los bloques mostrados en la figura 2.23.

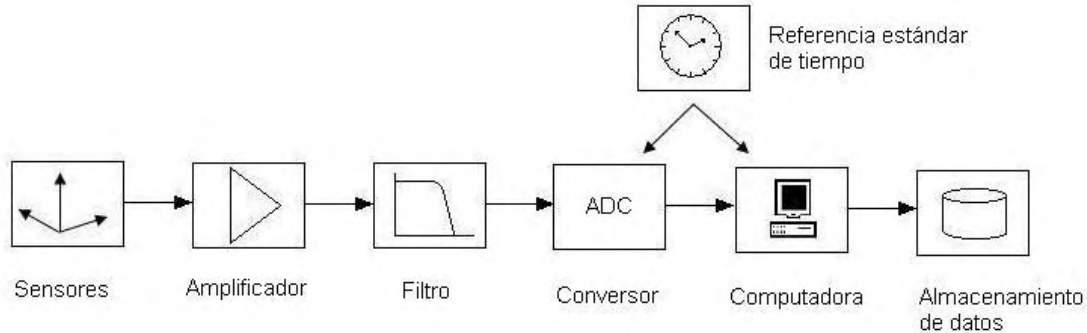


Figura 2.23. Sistema típico de adquisición y registro de datos sísmicos.

Como se observa en la figura, la variable de entrada es el movimiento del suelo, la cual se convierte mediante un sensor a una forma útil como voltaje y se acondiciona usando un amplificador y un filtro. Después, se digitaliza la señal acondicionada usando un conversor analógico a digital (ADC: Analog to Digital Converter) y se manda a través de una interfaz a una computadora, donde se hace el registro de los datos adquiridos, en algún dispositivo de almacenamiento. Cabe mencionar que los datos registrados deben tener una referencia de tiempo, la cual se envía al dispositivo de control del ADC o a una computadora, lo anterior es con el fin de etiquetar los datos. En los siguientes apartados se describirán cada uno de los componentes mencionados.

2.2.1. Sensores sísmicos

Un sensor sísmico es un dispositivo que detecta el movimiento del suelo cuando éste es sacudido por una perturbación. Idealmente, se puede considerar a un sensor sísmico como una caja negra, cuya entrada es el movimiento de la tierra, representado por una variable cinemática como desplazamiento, velocidad o aceleración, y cuya salida puede ser alguna variable como voltaje o el desplazamiento de una aguja. Dependiendo de la variable medida, los sensores sísmicos se pueden clasificar según si son de desplazamiento o deformación, de velocidad y de aceleración.

En sismología, el movimiento mínimo esperado es tan pequeño como el ruido presente en la tierra (0.1 nm) o tan grande como el desplazamiento máximo ocurrido en una falla durante un terremoto (10m). Esto representa un rango dinámico de $(10/10^{-10})=10^{11}$, el cual es difícil cubrir con un solo sensor. Tradicionalmente, los acelerómetros se han utilizado para la medición de movimientos fuertes, mientras que los sensores de velocidad encuentran su aplicación en movimientos débiles, cubriendo así un rango amplio.

Por otro lado, el rango de frecuencia de las señales sísmicas es muy amplio, comenzando en valores tan bajos como 0.00001 Hz y extendiéndose hasta 1000 Hz. Para

cubrir todo este rango es necesario disponer de varios tipos de sensores. En este sentido, los sensores se pueden clasificar por su ancho de banda como:

- Periodo corto (SP: Short Period). Son capaces de captar señales entre 0.1 y 100 Hz, con una frecuencia natural entorno a 1 Hz (valores típicos). Estos se pueden usar para el estudio de terremotos pequeños o experimentos de refracción y tienen la ventaja de que son fáciles de instalar y operar, y no requieren de una fuente de alimentación.
- Banda ancha (BB: Broad Band). Proveen información sísmica en el rango de frecuencia de 0.01 Hz a 50 Hz. Estos requieren de una fuente de alimentación con polaridad simple o doble, además de una instalación más cuidadosa.
- Banda muy ancha (VBB: Very Broad Band). Estos son capaces de captar señales de frecuencias muy bajas, como las provenientes de mareas terrestres y oscilaciones libres. Su ancho de banda se extiende desde 0.001 hasta 10 Hz y tienen como principal aplicación la investigación de la profundidad de la tierra.

La elección del tipo de sensor depende de la aplicación de interés, ya que en aplicaciones donde se requiere detectar señales de muy baja frecuencia, el sensor puede llegar a ser el componente más caro del sistema. En la tabla 2.4 se indican las bandas de interés para diversas fuentes sísmicas.

Frecuencia (Hz)	Tipo de medición
0.00001-0.0001	Mareas terrestres
0.0001-0.001	Oscilaciones libres de la tierra, terremotos
0.001-0.01	Ondas superficiales, terremotos
0.01-0.1	Ondas superficiales, ondas P y S, terremotos con $M > 6$
0.1-10	Ondas P y S, terremotos con $M > 2$
10-1000	Ondas P y S, terremotos con $M < 2$

Tabla 2.4. Frecuencias típicas generadas por diferentes fuentes sísmicas.

Los sensores sísmicos existentes se pueden clasificar también en pasivos y activos y éstos a su vez pueden medir las componentes de movimiento vertical u horizontal. En las secciones siguientes se comentará con más detalle el funcionamiento de cada uno ellos.

Sensores pasivos

Los sensores pasivos son aquéllos que no requieren de una fuente de alimentación para su funcionamiento y dentro de esta categoría se encuentran los sensores mecánicos y los sensores electromagnéticos.

El sensor mecánico

Debido a que las mediciones se hacen en un marco de referencia en movimiento (la superficie de la tierra), casi todos los sensores sísmicos están basados en la inercia de una

masa suspendida, la cual tenderá a permanecer estacionaria en respuesta a un movimiento externo. El movimiento relativo entre la masa suspendida y la tierra será entonces una función del movimiento de la tierra.

Como se observa en la figura 2.24, un sensor mecánico vertical consiste básicamente de una masa, un resorte y un amortiguador.

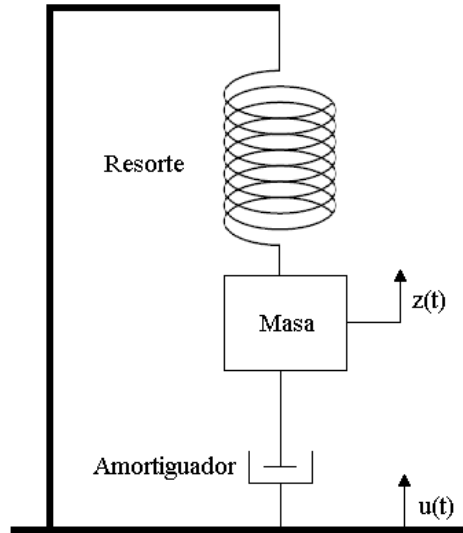


Figura 2.24. Sensor mecánico vertical.

Si se considera a $u(t)$ como el movimiento vertical de la tierra y a $z(t)$ como el desplazamiento de la masa m con respecto a la tierra, ambos positivos hacia arriba, hay dos fuerzas que se oponen al movimiento de la masa: la fuerza del resorte $-kz$, donde k es la constante del resorte, y el amortiguamiento $-d\dot{z}$, donde d es la constante de fricción y \dot{z} es la velocidad. La aceleración de la masa con respecto al marco de referencia inercial es la suma de la aceleración (\ddot{z}) con respecto a la tierra y la aceleración de la tierra (\ddot{u}). Aplicando la segunda ley de Newton, que dice que la suma de las fuerzas debe ser igual a la suma de las aceleraciones por la masa, se puede plantear la siguiente ecuación:

$$-kz - d\dot{z} = m\ddot{z} + m\ddot{u} \quad (2.14)$$

Para un sistema de segundo orden como el descrito por la ecuación anterior, se define la frecuencia natural como $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ y la constante de amortiguamiento como $h = d/(2m\omega_0)$. De modo que la ecuación 2.14 puede reescribirse como:

$$\ddot{z} + 2h\omega_0\dot{z} + \omega_0^2z = -\ddot{u} \quad (2.15)$$

Resolviendo la ecuación 2.15 en el dominio de la frecuencia, se puede calcular la relación entre la salida y la entrada (también denominada la función de la respuesta en frecuencia del desplazamiento), $T_d(\omega)$.

$$T_d(\omega) = \frac{Z(\omega)}{U(\omega)} = \frac{\omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0h} \quad (2.16)$$

De la expresión anterior se puede calcular la respuesta en amplitud $A_d(\omega)$ y la respuesta en fase $\varphi_d(\omega)$ del desplazamiento:

$$A_d(\omega) = |T_d(\omega)| = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2\omega^2\omega_0^2}} \quad (2.17)$$

$$\varphi_d(\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{-2h\omega\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) \quad (2.18)$$

La figura 2.25 muestra la respuesta en fase y en amplitud de un sensor con una frecuencia natural de 1Hz y una constante de amortiguamiento con valores de 0.25 a 4. Como se observa, una constante de amortiguamiento baja ($h < 1$) da como resultado un pico en la respuesta. Si $h = 1$, la masa del sensor retorna a su posición de reposo en el menor tiempo posible, sin sobrepaso, la curva no tiene pico y se dice que el sensor está críticamente amortiguado. De la curva y la ecuación 2.16, se puede ver que el sensor se comporta como un filtro paso alto para el desplazamiento de la tierra. El valor más comúnmente usado para la constante de amortiguamiento es $h = 0.707$, debido a que se puede describir la respuesta como un filtro paso altas de segundo orden con frecuencia de corte en ω_0 . Por otro lado, cuando $h > 1$ la sensibilidad disminuye.

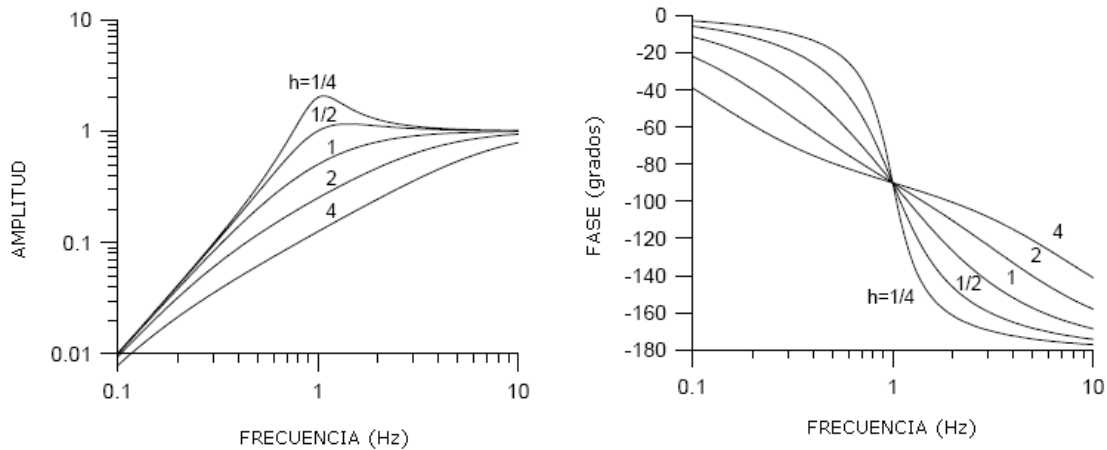


Figura 2.25. Respuesta en frecuencia de un sensor mecánico.

El sensor electromagnético

Los sensores electromagnéticos tienen como principio de funcionamiento el movimiento de una bobina dentro de un campo magnético, produciéndose a la salida de la bobina un voltaje proporcional a la velocidad de la masa (figura 2.26). El amortiguamiento se manifiesta en la fuerza magnética producida por el paso de la corriente a través de la bobina.

En este sistema la señal de salida es un voltaje proporcional a la velocidad de la masa, $\dot{Z}(\omega)$, y a la constante del generador G , en lugar de $Z(\omega)$, como lo era para los sensores mecánicos. De aquí que la respuesta del desplazamiento para el sensor de velocidad es entonces:

$$T_d^v(\omega) = \frac{\dot{Z}(\omega)}{U(\omega)} G = \frac{i\omega^3 G}{\omega_0^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_0 h} \quad (2.19)$$

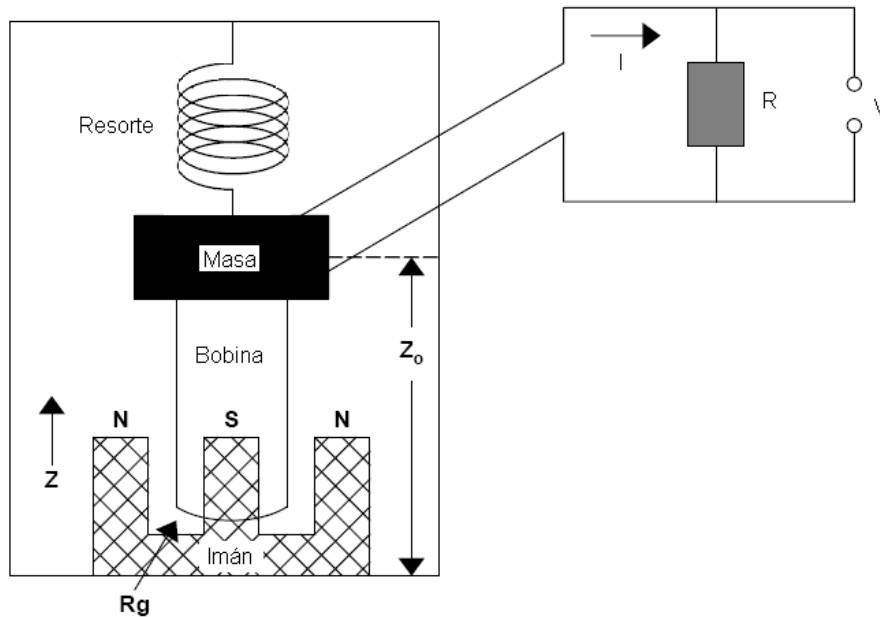


Figura 2.26. Sensor electromagnético.

Los sensores sísmicos basados en el principio electromagnético tienen como parámetros importantes, la constante del generador G y la resistencia de la bobina R_g . La primera relaciona la velocidad de la tierra con la salida de la bobina y sus valores típicos están en el rango de 30 a 500 V/ms^{-1} . La segunda depende del número de vueltas del alambre usado en la construcción de la bobina y se expresa en ohms.

Restricción del movimiento en sensores sísmicos

El sistema masa-resorte-amortiguador de un sensor vertical sirve para entender el principio de funcionamiento de un sensor sísmico, pero en diseños prácticos el sistema es muy simple, debido a que estrictamente se deben restringir cinco de los seis grados de libertad de la masa sísmica (traslacional y rotacional) y dejar que la masa se mueva libremente en la dirección restante. Para restringir el movimiento a una sola dirección traslacional, la mayoría de sensores sísmicos tienen algún dispositivo mecánico. En la figura 2.27 se muestra que una manera de restringir el movimiento en un sensor vertical es sujetando la masa a una varilla y ésta a su vez a una bisagra. En este caso, se puede notar

que la masa no sólo tiene un movimiento vertical, sino que también tiene un movimiento circular tangente a la dirección vertical. Sin embargo, para pequeños movimientos el movimiento circular se considera lineal.

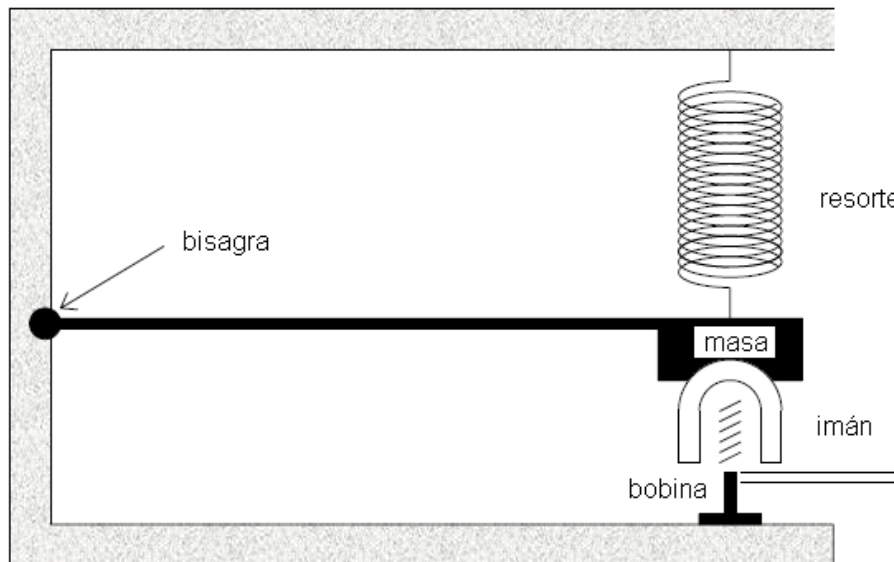


Figura 2.27. Restricción del movimiento vertical.

Otra forma de restringir el movimiento es mediante el uso del principio del péndulo, en donde la masa gira alrededor de un eje definido por bisagras. La ventaja de utilizar un péndulo es que para movimientos pequeños se puede utilizar la ecuación 2.14 para describir su comportamiento, intercambiando z por el ángulo de rotación.

Algunas de las configuraciones más conocidas que utilizan el principio de un péndulo son:

Garden gate: éste consta de una masa sujeta a un soporte que se mueve sobre un plano horizontal y alrededor de un eje casi vertical. Este arreglo permite la medición del movimiento horizontal (figura 2.28a).

Péndulo invertido: en éste la masa es soportada por resortes y una varilla con una bisagra. Con este arreglo es posible medir el movimiento horizontal (figura 2.28b).

Lacoste: está formado por una masa soportada por un resorte y una varilla sujeta por una bisagra. Este arreglo sirve para la medición del movimiento vertical (figura 2.28c), sin embargo con un arreglo modificado se pueden medir las componentes vertical y horizontal de movimiento (figura 2.28d).

Leaf spring: son arreglos similares a los de Lacoste, pero más fáciles de fabricar debido a que el resorte se sustituye por una lámina con un comportamiento equivalente (figura 2.28 e y f).

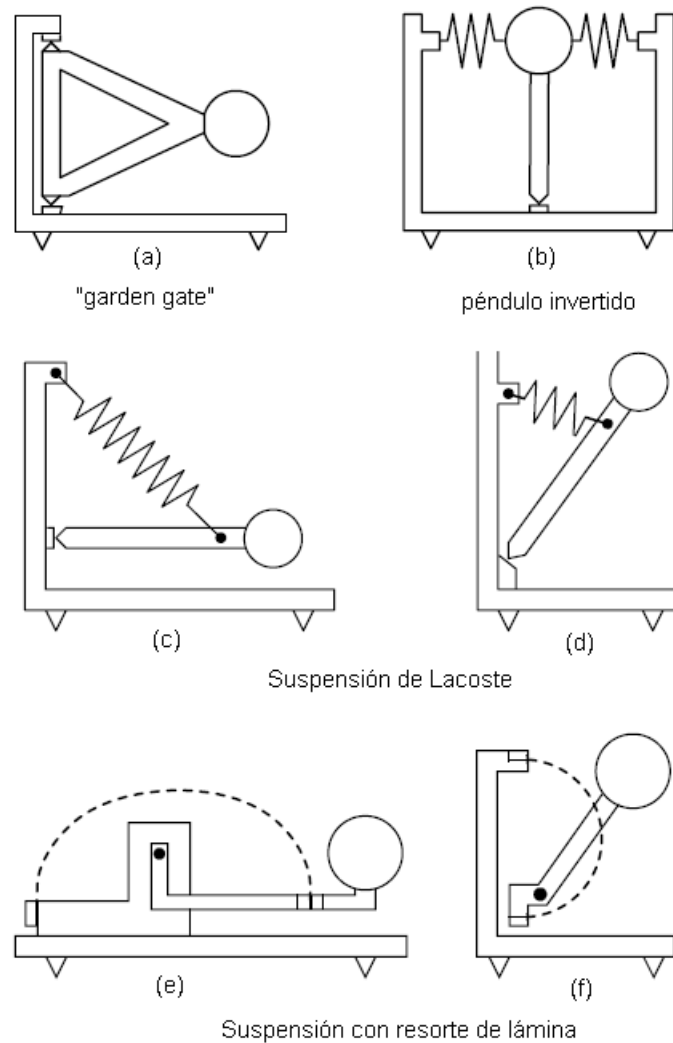


Figura 2.28. Configuraciones típicas que utilizan el principio del péndulo.

Sensores activos

Los sensores activos son aquéllos que deben tener una fuente de alimentación de energía, debido a que para su funcionamiento utilizan circuitos electrónicos. En esta clasificación están los acelerómetros, los sensores de velocidad de banda ancha y los sensores de realimentación negativa.

Los acelerómetros

Los acelerómetros, o sensores de movimiento fuerte, por definición miden aceleraciones grandes, típicamente de 1 a 2 g, donde g representa la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2). Los acelerómetros antiguos se basaban en un sensor mecánico con una frecuencia natural alta, para asegurar que la salida fuera proporcional a la aceleración y

se grababa ópticamente en una película. Los acelerómetros actuales son de fuerza balanceada (FBA: Force Balanced Accelerometer) y han tenido un mejoramiento importante en su desempeño.

El FBA está compuesto por una masa, un resorte, una bobina y un transductor de desplazamiento de tipo capacitivo (figura 2.29a). En este tipo de sensor, el transductor de desplazamiento genera una corriente en respuesta al movimiento de la masa. A través del resistor se envía dicha corriente a la bobina, donde se genera una fuerza para compensar la fuerza externa ejercida sobre la masa e impedir que se mueva del todo. Debido a que la corriente es proporcional a la aceleración de la tierra, ésta se puede estimar a partir del voltaje en el resistor.

Como se observa en la figura 2.29b, este tipo de sensor se representa como un sistema con realimentación cuya entrada es la aceleración de la tierra y cuya salida es un voltaje proporcional a dicha aceleración. La ecuación de lazo cerrado que caracteriza este tipo de sensor es:

$$T(\omega) = \frac{V(\omega)}{\ddot{U}(\omega)} = \frac{T_1(\omega)}{\omega_0^2 + \frac{\sigma T_1(\omega)}{mR} - \omega^2 + 2ih\omega\omega_0} \quad (2.20)$$

donde m es la masa sísmica en kg, R es la resistencia de realimentación en Ω , h es la constante de amortiguamiento, ω_0 es la frecuencia natural en hz, σ es la constante del transductor de fuerza en N/A y $T_1(\omega)$ es la respuesta de un integrador (filtro paso bajas) caracterizada por la siguiente ecuación:

$$T_1(\omega) = \frac{D}{i\omega\tau_1 + 1} \quad (2.21)$$

donde D es la constante del transductor de desplazamiento en V/m y τ_1 es la constante de tiempo del filtro paso bajas con frecuencia de corte en $f=1/(2\pi\tau_1)$.

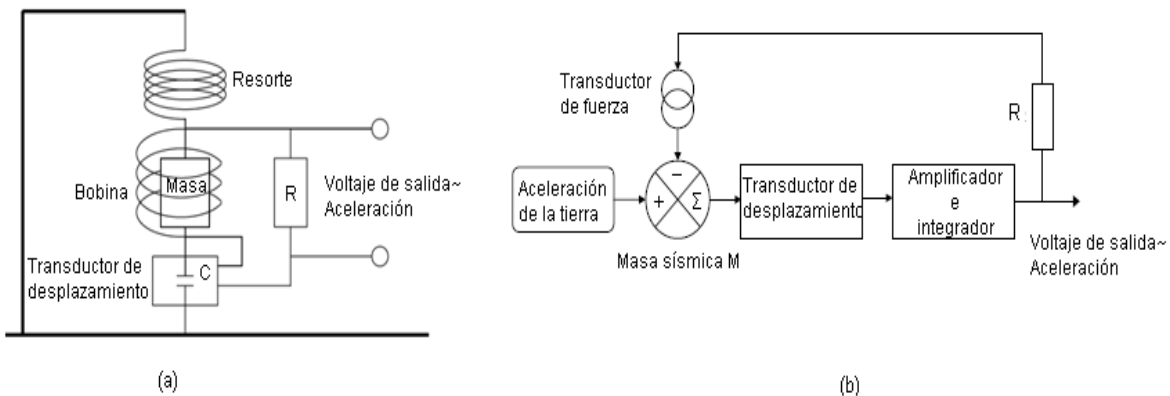


Figura 2.29. Acelerómetro de fuerza balanceada.

El FBA tiene la ventaja de ofrecer una respuesta plana a frecuencias tan bajas como DC, pero con la limitante de que tiene una frecuencia superior límite (ver figura 2.30).

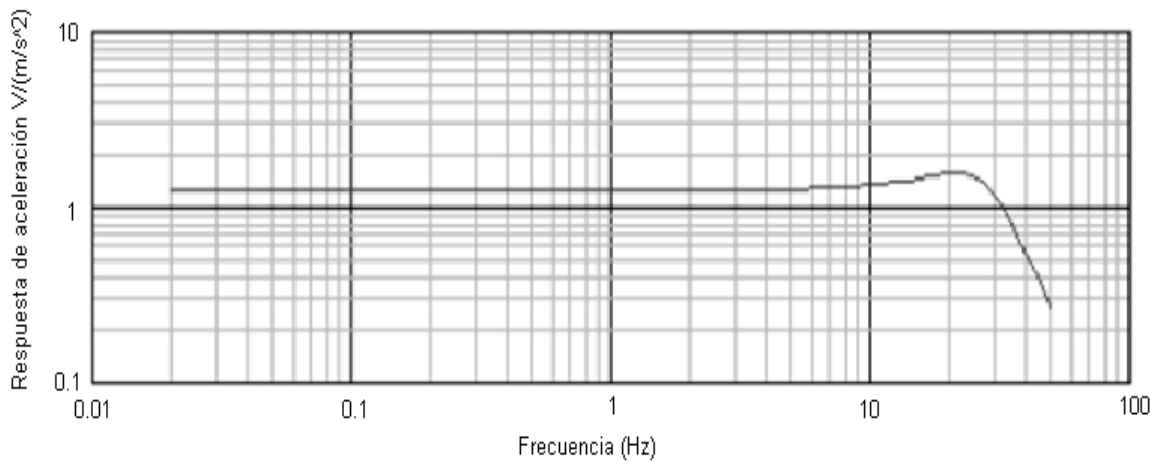


Figura 2.30. Respuesta en frecuencia de un FBA.

Sensores de velocidad de banda ancha

Los sensores de velocidad de banda ancha se basan en el principio de operación de un FBA, pero con la salvedad de que utilizan una realimentación seleccionada cuidadosamente para obtener un resultado eficiente en términos de rango dinámico. Dicha realimentación consiste en un capacitor grande, que contribuye a que la corriente de realimentación sea proporcional a la aceleración y a que la salida a través del capacitor sea la integral de dicha corriente y por tanto proporcional a la velocidad de la tierra (ver figura 2.31).

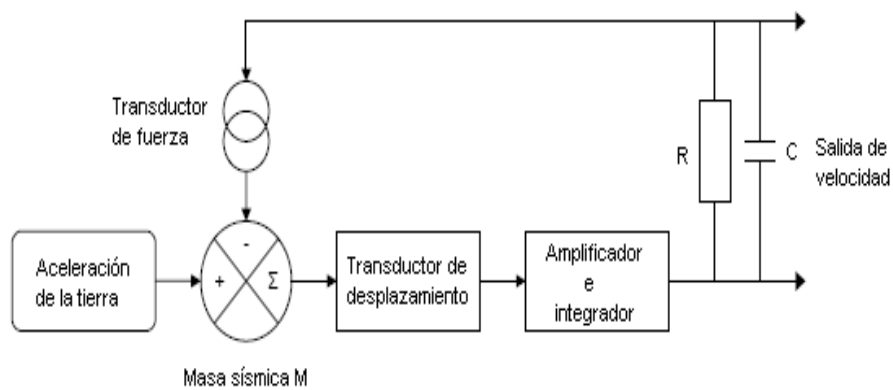


Figura 2.31. Sensor de velocidad de banda ancha.

En la práctica, se suele agregar otro nodo de realimentación que aporta una corriente proporcional a la integral de la salida de velocidad. Esto último se hace con la intención de modelar la respuesta en frecuencia como si fuera un sensor electromagnético de periodo largo, extendiendo la respuesta a bajas frecuencias y con una frecuencia máxima menor (ver figura 2.32). La ecuación de lazo cerrado que caracteriza a este tipo de sensor es:

$$T(\omega) = \frac{-T_1(\omega)i\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2 + 2ih\omega\omega_0) + \frac{\sigma}{m} \left(\frac{RCi\omega + 1}{R} + \frac{T_2(\omega)}{R_2} \right) T_1(\omega)} \quad (2.22)$$

Las variables de la ecuación 2.22 son las mismas que se explicaron para las ecuaciones 2.20 y 2.21. Solamente se tienen tres variables nuevas: C que es el valor del capacitor de salida en Faradios, R_2 que es la resistencia del segundo nodo de realimentación en Ω y $T_2(\omega)$ que es un segundo integrador del mismo tipo que $T_1(\omega)$, pero con una constante de tiempo más grande.

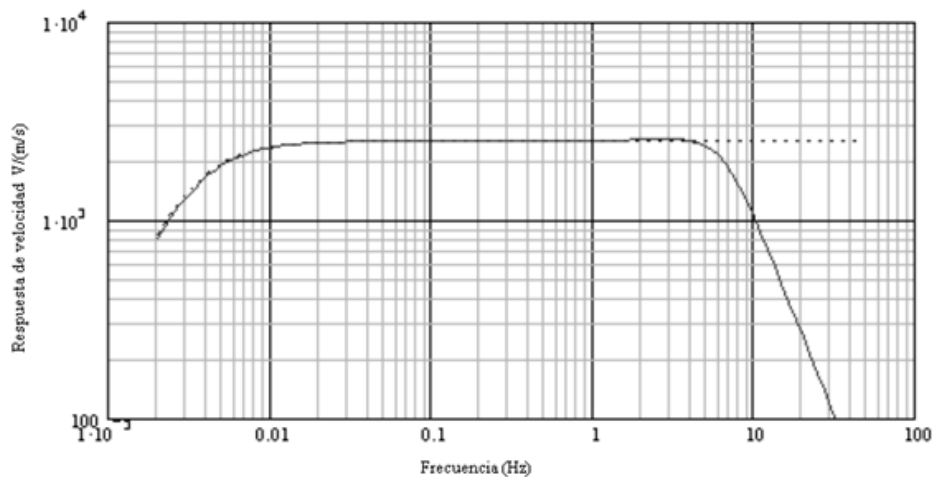


Figura 2.32. Respuesta en frecuencia de un sensor de velocidad de banda ancha.

La respuesta de velocidad de este tipo de sensor está determinada principalmente por 4 componentes pasivos (R , C , la masa y la bobina de realimentación). Además, se puede considerar como si se tratara de un sensor de velocidad convencional, descrito por sus parámetros comunes: período libre, amortiguamiento y constante del generador.

Estos sensores están disponibles en un extenso rango de características y precios. Generalmente, entre mejor sea la relación señal a ruido y más baja sea la frecuencia inferior, el costo es mayor.

Sensores con realimentación negativa

Los sensores con realimentación negativa se construyen a partir de sensores electromagnéticos convencionales, pero a la salida de éstos se coloca un circuito de realimentación como el mostrado en la figura 2.33, con el que se logra extender la respuesta en frecuencia.

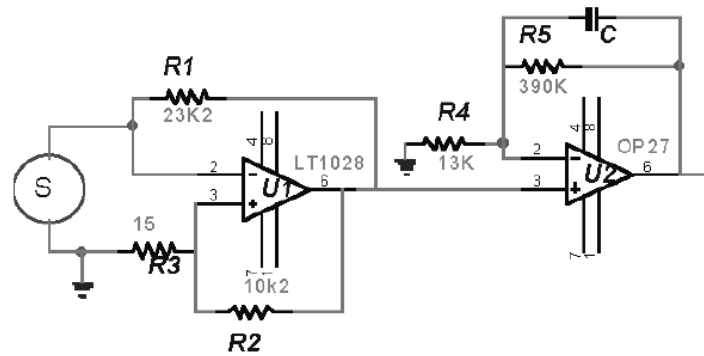


Figura 2.33. Circuito típico para extender la respuesta de un sensor electromagnético.

La ventaja de este diseño es que se pueden construir sensores con respuesta en frecuencia extendida a partir de sensores baratos, como los geófonos de 4.5 Hz. Sin embargo, debido a las limitaciones de los parámetros eléctricos y mecánicos, la frecuencia inferior no se puede extender más de un factor de 5. Así, un sensor de 4.5 Hz sólo podrá llegar a ser un sensor de 1.0 Hz.

2.2.2. Amplificador

La señal de salida de los sensores puede ser tan pequeña como la proveniente de un geófono o moderadamente alta como la generada por un sensor de banda ancha. Si, por ejemplo, la velocidad de la tierra es una onda senoidal de 5 Hz y 1 nm/s de amplitud (ruido típico de fondo en una estación de bajo ruido), un geófono estándar de 4.5 Hz con una constante de generador de 30 V/ms^{-1} daría una salida de 30 nV, mientras que un sensor de banda ancha con una constante de generador de 1500 V/ms^{-1} daría 1500 nV. Estos voltajes normalmente no se pueden adquirir directamente con algún dispositivo de grabado, por lo que deben amplificarse. Esto no es una tarea tan fácil, ya que se requiere de un amplificador de bajo ruido, que abarque el extenso rango de frecuencias utilizadas en sismología y que esté libre de distorsiones de amplitud y fase. Además, debido a que ésta es la parte de entrada del sistema de adquisición de datos, normalmente determina o limita la sensibilidad, más que el sensor en sí mismo.

Por otra parte, el amplificador no es la única fuente de ruido. Otra fuente de ruido importante proviene del acoplamiento entre el sensor y el amplificador. Si se usan cables largos, el ruido inducido por un ambiente eléctricamente ruidoso puede también producir un ruido de entrada elevado. Para reducir este ruido se usan amplificadores diferenciales, no porque generen menos ruido intrínseco, sino porque son mejores reduciendo el ruido externo de igual magnitud en ambas terminales. Los cables deben estar blindados, pero aun así, puede ser difícil deshacerse del ruido y, en instalaciones prácticas, se debe experimentar algunas veces para evitar el ruido en los cables.

2.2.3. Conversor analógico a digital

Debido a que las computadoras son el corazón de todo sistema de procesamiento, se deben convertir las señales analógicas a números representando la señal a intervalos discretos. Este proceso se le conoce como conversión analógica a digital y, como puede

verse en la figura 2.34, involucra tres etapas: el muestreo, la cuantización y la codificación. En la primera, la señal se muestrea a intervalos de tiempo discretos; en la segunda, se mide el nivel de cada muestra para asignarle un valor numérico y en la última se codifica dicho valor a binario.

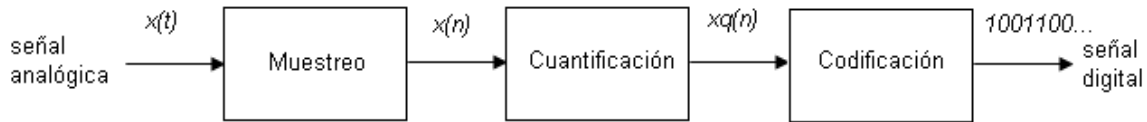


Figura 2.34. Proceso de conversión analógica a digital.

Cabe mencionar que en sismología se suele utilizar la unidad *cuenta* para medir el nivel de amplitud de la señal digital. En este sentido, una *cuenta* se define como la representación decimal del número binario.

Por otro lado, el proceso de conversión se lleva a cabo en un dispositivo electrónico denominado ADC, el cual convierte un voltaje determinado en un valor binario. Este dispositivo tiene varios parámetros, los cuales se comentan en el siguiente apartado.

Parámetros básicos de los conversores analógico a digital

Los parámetros que se usan con mayor frecuencia para la descripción de un ADC son: resolución, ganancia, frecuencia de muestreo, máxima entrada de escala completa, rango dinámico, impedancia de entrada, *offset*, nivel de ruido y tiempo de conversión.

Resolución: es el valor más pequeño de la variable bajo medición que se puede detectar, correspondiendo digitalmente a un cambio en el bit menos significativo. El número de bits es también referido frecuentemente como la resolución. La mayoría de los ADC tienen un ruido interno mayor a una *cuenta*, por lo que la resolución efectiva se ve afectada por el número de bits libres de ruido. Por ejemplo, una *cuenta* corresponde a $0.3 \mu\text{V}$ en un ADC de 24 bits, con escala completa de $\pm 2.5 \text{ V}$, pero puede tener un ruido de $2 \mu\text{V}$ pico a pico y señales bajo este nivel no pueden ser vistas en la práctica.

Ganancia: es la sensibilidad expresada en cuentas/V. Esta se puede obtener a partir de la resolución. Por ejemplo si la resolución es $10 \mu\text{V}$, la ganancia sería $1 \text{ cuenta}/(10^{-5} \text{ V})=10^5$ cuentas/V.

Frecuencia de muestreo: es el número de muestras que se toman por segundo. Este valor se expresa en Hertz o en muestras por segundo.

Máxima entrada de escala completa: es la máxima entrada de voltaje que el ADC puede convertir sin que éste se sature. Los valores típicos están en un rango de ± 1 a $\pm 30\text{V}$.

Rango dinámico: se define como la relación entre el valor más grande y el valor más pequeño que el ADC puede aceptar. Por ejemplo, si el valor más grande es 4 y el más chico

es 1, el rango dinámico es $4/1=4$; en decibeles, $20 \log(4/1)= 12\text{dB}$. En algunos conversores, los bits más bajos contienen ruido, por lo que el rango dinámico se define como la relación entre la entrada más grande de voltaje y el nivel de ruido del conversor. Este número puede ser sustancialmente más pequeño que el rango dinámico más grande teórico y depende de la frecuencia de muestreo.

Impedancia de entrada: este parámetro idealmente debe ser tan grande como sea posible para no alterar la señal proveniente del sensor. Un valor típico es de $1\text{M}\Omega$.

Offset: es el nivel de voltaje de DC presente en la salida si la entrada es cero.

Nivel de ruido: es el número de cuentas de salida si la entrada es cero (sustrayendo el nivel de offset).

Tiempo de conversión: es el tiempo mínimo requerido para efectuar una conversión. Típicamente se expresa como la máxima frecuencia de muestreo.

Tipos de conversores analógico a digital

Existe una gran variedad de conversores los cuales proveen diferentes velocidades de conversión, éstos usan diferentes interfaces y proveen diferentes grados de exactitud. Los conversores que enseguida se describirán son: el *flash*, el de aproximaciones sucesivas y el sigma-delta, por ser los más importantes, no obstante existen otros tipos más.

Flash: este conversor se destaca por su elevada velocidad de funcionamiento. Está formado básicamente por una cadena de divisores de tensión y comparadores, realizando la conversión en una sola operación. Su principal desventaja es su elevado costo.

De aproximaciones sucesivas: este conversor tiene un circuito de muestreo y retención, un conversor digital a analógico (DAC: Digital to Analog Converter), un comparador y una lógica de control. Al inicio de la conversión, la lógica de control pone a la entrada del DAC una señal digital equivalente a la mitad de su rango. Luego, se compara la señal de entrada presente en el circuito de muestreo y retención con la señal de salida del DAC para saber si está por encima o por debajo de la mitad del rango. Si la señal de entrada está por encima de la mitad del rango, la lógica de control envía una señal al DAC equivalente a tres cuartos del rango. Si la señal de entrada está por debajo de la mitad del rango, la lógica de control envía una señal al DAC equivalente a un cuarto del rango. Este proceso continúa hasta que encontrar la mejor aproximación al valor de entrada, momento en el cual se habilita la salida del ADC. Este comparador es el más común debido a que es apto para aplicaciones que no necesitan grandes resoluciones ni grandes velocidades. Debido a su bajo costo se suele integrar en la mayoría de los microcontroladores, permitiendo una solución de bajo costo en un único *chip* para numerosas aplicaciones de control. Su principal desventaja es el elevado tiempo de conversión.

Sigma-Delta: utiliza como base un conversor digital a analógico, el filtrado y el sobremuestreo, para alcanzar conversiones muy precisas. La principal ventaja de este tipo

de conversores es su alta resolución y elevada relación señal a ruido, sin embargo tiene la desventaja de que su velocidad máxima de conversión es baja.

En la figura 2.35 se muestra el rango de resoluciones y la máxima velocidad de conversión para los tres tipos de conversores expuestos anteriormente.

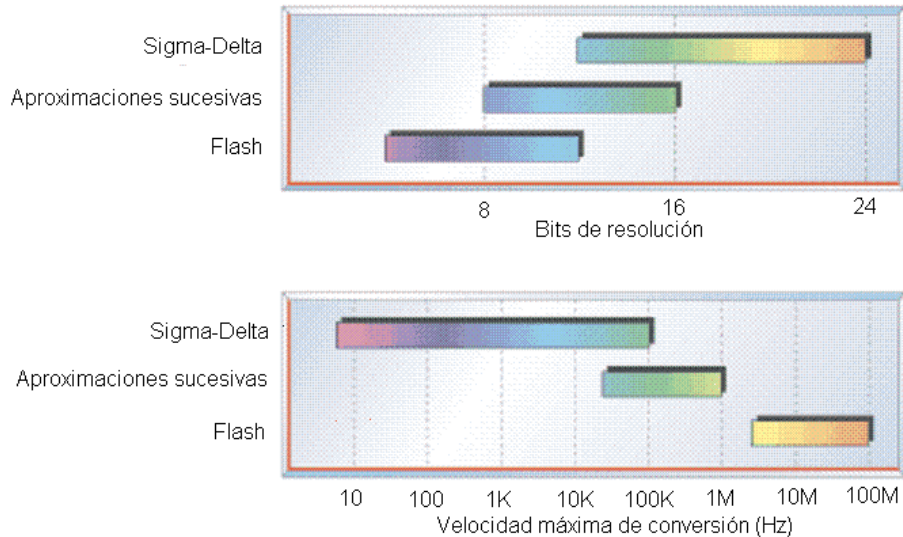


Figura 2.35. Comparación de conversores analógico a digital.

Los conversores *flash* no son muy utilizados en aplicaciones sísmicas debido a que para resoluciones altas son muy caros. Los conversores de aproximaciones sucesivas se suelen utilizar sólo para resoluciones menores a 16 bits. Actualmente, los conversores sigma-delta son los que se usan generalmente en aplicaciones de sismología. La razón de esto es porque se esperan movimientos con un rango extenso en amplitud y la manera de cubrirlos ofreciendo una resolución alta, es con este tipo de conversores. Además, debido a que las frecuencias de las señales sísmicas son bajas, no requieren que la velocidad de conversión sea muy elevada.

Aliasing

El teorema de muestreo establece que la frecuencia con la que se debe muestrear una señal continua, para poder recuperarla sin distorsión, debe ser al menos dos veces la frecuencia de la señal. Si se muestrea a una frecuencia menor a lo que establece el teorema de muestreo, se presenta el fenómeno conocido como *aliasing*, el cual provoca que aparezcan componentes de baja frecuencia que no existen en la señal original. La siguiente figura muestra la representación de una señal con *aliasing* y la de una señal muestreada adecuadamente.

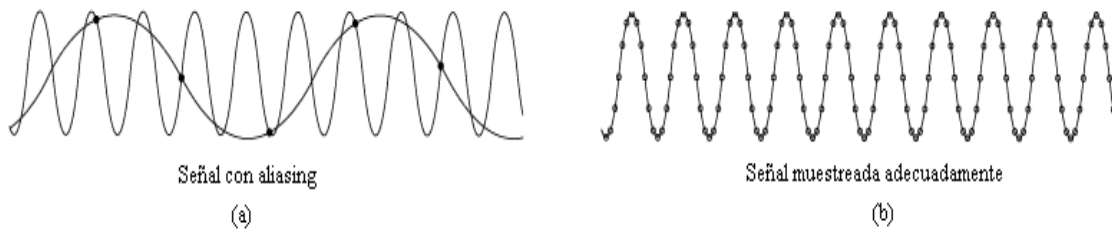


Figura 2.36. Señales con y sin aliasing.

En el dominio de la frecuencia, cuando se muestrea una señal de frecuencia f_0 , su espectro aparece repetido y centrado en múltiplos de la frecuencia de muestreo f_s . Cuando se viola el teorema de muestreo, el fenómeno de *aliasing* se manifiesta como un traslape entre los espectros, lo cual impide recuperar la señal correctamente (figura 2.37a). El sobremuestreo evita que se presente el traslape entre los espectros (figura 2.37b).

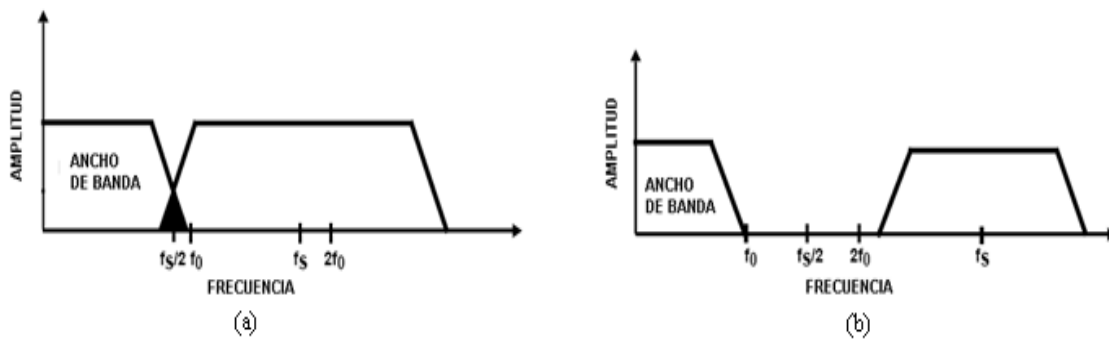


Figura 2.37. Espectro de una señal con y sin aliasing.

Filtro antialiasing

En la práctica, la señal de interés generalmente contiene componentes de frecuencia mayores a las de la señal deseada, lo cual puede provocar que se presente el fenómeno de *aliasing* en el muestreo. Para evitar que esto suceda, antes del ADC se utiliza un filtro *antialiasing* (filtro paso-bajas), el cual permite el paso de las componentes de baja frecuencia y atenúa las de alta frecuencia. La figura 2.38 muestra este tipo de filtro donde se dejan pasar todas las frecuencias menores a f_1 y se eliminan todas las frecuencias mayores a f_2 . La región entre f_1 y f_2 es la banda de transición, la cual contiene una atenuación gradual de las frecuencias de entrada. A pesar de que sólo se quiere dejar pasar frecuencias menores a f_1 , las señales en la banda de transición podrían causar *aliasing*, por lo que en la práctica se utiliza una frecuencia de muestreo mayor a dos veces la máxima frecuencia en la banda de transición.

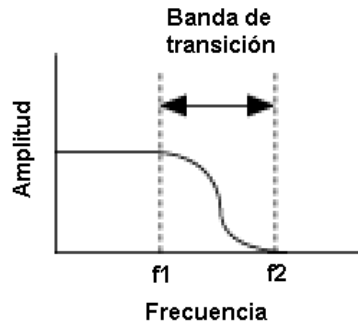


Figura 2.38. Filtro antialiasing.

2.2.4. Referencia de tiempo

Una de las necesidades más importantes de los sistemas de adquisición de datos sísmicos es el mantenimiento de una buena referencia de tiempo. Las dos opciones para realizar esta tarea son básicamente dos: la primera se basa en el control del tiempo en la tarjeta de adquisición de datos, mientras que la segunda se hace en la computadora.

En una tarjeta de adquisición generalmente se tiene un reloj en tiempo real. Este reloj está basado en un oscilador controlado por un cristal, el cual se sincroniza con el pulso por segundo (PPS) enviado por un receptor que utilice el sistema de posicionamiento global (GPS: Global Positioning System). Debido a que las señales del receptor pueden desaparecer repentinamente, dependiendo de la localización de su antena, la exactitud en este caso depende de la deriva del reloj en tiempo real. Algunos sistemas no tienen unidad de reloj en tiempo real por separado por lo que se usa el reloj de la computadora. En este caso se requiere de un sistema operativo en tiempo real actualizado frecuentemente por un receptor GPS.

En las dos opciones comentadas anteriormente, se usa el tiempo universal coordinado (UTC: Universal Time Coordinated), el cual es el que se toma de referencia para el establecimiento de las diferentes zonas horarias. Este tiempo se utiliza debido a que es la manera más fácil de comparar los tiempos de arribo de las ondas sísmicas en lugares distantes.

En el desarrollo que se describirá más adelante se utiliza un dispositivo que convierte la información de tiempo de un receptor GPS a pulsos codificados de acuerdo al estándar DCF77.

GPS

El GPS es un sistema global de navegación por satélite que permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto, una persona, un vehículo o una nave con una alta precisión. Este sistema fue desarrollado y es operado por el departamento de defensa de los Estados Unidos.

El GPS funciona mediante una red de satélites (24 operativos y 3 de respaldo) en órbita con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de la tierra. Para determinar la posición, el receptor localiza automáticamente como mínimo tres satélites de la red, de los que recibe unas señales indicando la posición y el reloj de cada uno de ellos. Con base en el tiempo que tardan en llegar estas señales al receptor, se calculan las distancias de éste a cada satélite y con éstas se determina la posición relativa de receptor respecto a los tres satélites. Conociendo además las coordenadas de cada satélite por la señal que emiten, se obtiene la posición absoluta del punto de medición.

Los receptores GPS transmiten los datos recibidos a otro dispositivo utilizando el estándar NMEA 0183, el cual fue creado por la Asociación Electrónica Marítima Nacional (NMEA: National Marine Electronics Association). En este estándar los datos se transmiten de manera serial en bloques denominados sentencias. Existen varias sentencias definidas en el estándar, las cuales contienen diversos tipos de información. El formato de las sentencias es el siguiente: cada sentencia empieza con el signo "\$", los siguientes cinco caracteres identifican el tipo de sentencia, todos los campos que siguen están delimitados por una coma y al final se tiene un asterisco y dos dígitos de *checksum*. Un ejemplo de una sentencia es el siguiente:

```
$GPZDA,hhmmss.ssss,dd,mm,yyyy,xx,yy*CC  
$GPZDA,123336.8069,17,06,2001,13.0*32
```

En esta sentencia hhmmss.ssss es la hora, el minuto, el segundo y el milisegundo UTC; dd es el día, mm es el mes, yyyy es el año, xx es la hora de la zona local, yy es el minuto de la zona local, el asterisco (*) y finalmente el *checksum* (CC).

DCF77

DCF77 es un transmisor de radio de onda larga situado en Mainfield (aproximadamente 25 km al sureste de Fráncfort, Alemania) que transmite las señales de tiempo generadas por un reloj atómico en una señal portadora de 77.5 kHz con una potencia de 50 kW. La señal DCF77 puede recibirse en gran parte del territorio europeo abarcando hasta 2000 km de distancia de Fráncfort. En las siglas DCF77, D significa Alemania (*Deutschland*), C significa señal de onda larga, F significa Fráncfort y 77 es la frecuencia (77.5kHz).

El protocolo para transmitir los datos de tiempo utiliza 60 bits. Del bit 0 al bit 58 se utilizan para enviar cada minuto la fecha y el tiempo completo. El bit 59 se utiliza como marcador para detectar el comienzo de cada minuto. En la figura 2.39 se muestra la forma en que se codifican los bits usados para transmitir el tiempo.

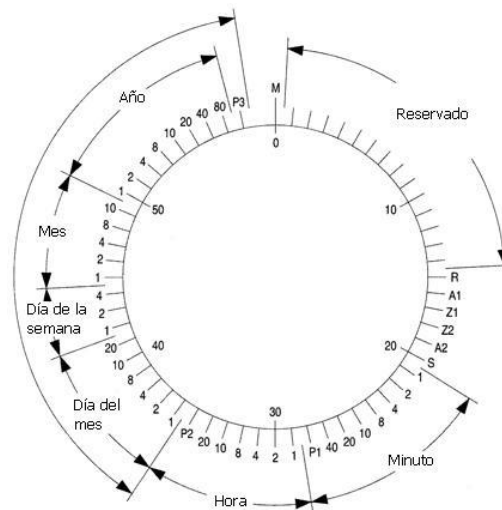


Figura 2.39. Codificación de los datos de tiempo enviados por un transmisor DCF77.

2.2.5. Interfaz

Debido a que los datos digitales obtenidos a partir de la conversión analógica a digital deben ser almacenados y procesados en una computadora, es necesaria la construcción de algún medio de enlace. En este sentido, se utilizan microcontroladores para recibir la información proveniente tanto del conversor como de la referencia de tiempo, organizarla de manera conveniente y enviarla en paquetes a la computadora. Por otra parte, estos dispositivos también son capaces de recibir instrucciones de la computadora para ajustar los parámetros de algunos componentes de *hardware* del sistema.

La transferencia de datos entre los dispositivos externos y la computadora se realiza a través una interfaz de entrada/salida denominada puerto de comunicaciones, la cual por simplicidad se denominará puerto. Hay dos tipos básicos de puertos de computadora: el serie y el paralelo. En el primero se transfiere un bit a la vez; mientras que en el segundo, se transmite 1 *byte* (8 bits) a la vez. Existen varios estándares utilizados para manejar tanto puertos serie como paralelos. Para una interfaz serie los estándares más conocidos son RS232, IEEE 1384 y USB, mientras que para una interfaz paralelo se utilizan el GPIB y el SCSI.

En la siguiente sección se comentarán los aspectos básicos del estándar RS232, el cual es uno de los más usados en sismología.

Estándar RS232

El estándar recomendado 232 (RS232: Recommended Standard 232) está definido en las especificaciones del instituto de estándares nacionales americanos (ANSI: American National Standards Institute) como la interfaz entre un equipo terminal de datos (ETD) y un equipo de comunicación de datos (ECD) empleando un intercambio en modo serie de datos binarios. Este es uno de los estándares más viejos y comunes para la interfaz serie, el

cual fue adoptado por la asociación de industrias electrónicas (EIA: Electronic Industries Association) y ha sufrido tres modificaciones, la más reciente hecha en 1997.

Normalmente, los dispositivos que intervienen en una comunicación serie son el ETD, que suele ser una computadora, y el ECD, generalmente un módem. A pesar de que el estándar RS232 empezó utilizándose para la comunicación entre una computadora y un módem, la gran importancia de las computadoras ha hecho posible la extensión de su uso para la conexión de periféricos como impresoras, ratones, escáneres, tarjetas de adquisición de datos, etcétera.

El estándar RS232 especifica 25 líneas entre el ETD y el ECD, requiriendo un conector DB25, aunque en la mayoría de aplicaciones es suficiente un mínimo de 3 líneas y un máximo de 11. Por esta razón también se suele utilizar un conector de 9 terminales (DB9). La figura 2.40 muestra los conectores y en la tabla 2.5 se describe la función de algunas terminales de los conectores mencionados.

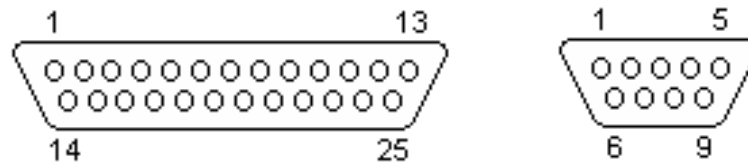


Figura 2.40. Conectores utilizados en el estándar RS232.

Nombre de la terminal	Conector DB25	Conector DB9	Dirección de la señal	Función
TxD	2	3	Salida	Datos transmitidos
RxD	3	2	Entrada	Datos recibidos
Gnd	7	5		Tierra
RTS <i>Request To Send</i>	4	7	Salida	Control de flujo en la transmisión de datos
CTS <i>Clear To Send</i>	5	8	Entrada	Permite realizar la transmisión de datos
DTR <i>Data Transmitter Ready</i>	20	4	Salida	Detector de línea recibida
DSR <i>Data Set Ready</i>	6	6	Entrada	Equipo de datos preparado
RI <i>Ring Indicator</i>	22	9	Entrada	Timbre indicador
DCD <i>Data Carrier Detect</i>	8	1	Entrada	Detector de línea recibida

Tabla 2.5. Función de algunas señales del estándar RS232.

Las características principales que definen el estándar RS232 son:

- Velocidad máxima de transmisión de datos: 20 kbits por segundo (kbps), aunque muchas veces se utiliza mayores velocidades con un resultado aceptable.
- Capacidad de carga máxima: 2500 pF, lo cual se traduce en una longitud máxima de cable entre la computadora y el periférico, de aproximadamente 15 metros.
- Niveles de voltaje de las señales: éstos van de +3 a +25 volts (0 binario en la línea de datos) y -3 a -25 volts (1 binario en la línea de datos).

2.2.6. Registrador de señales sísmicas

Un registrador de señales sísmicas está formado básicamente por una computadora de propósito general y el *software* necesario para realizar dicha función. Las principales tareas de un registrador de señales sísmicas son:

- Leer los datos provenientes de una o varias tarjetas de adquisición de datos.
- Si los datos no tienen una etiqueta de tiempo, la computadora deberá etiquetarlos, utilizando para ello el reloj de la misma.
- Almacenar los datos adquiridos en archivos.
- Proveer las interfaces de *hardware* y *software* necesarios en la comunicación con la tarjeta de adquisición de datos. En el caso del *software*, éste deberá permitir la configuración de la tarjeta.

De las tareas mencionadas anteriormente, sólo se comentará en la sección siguiente el almacenamiento de los datos, por ser uno de los aspectos más relevantes tratados en el desarrollo de este trabajo.

Almacenamiento de datos

En la actualidad, debido a la gran capacidad de almacenamiento de información en los discos duros, éstos ya no representan una limitante. En este caso, el *software* es el que tiene una importancia crítica, ya que determina cómo se almacenarán los datos, que tan rápido se escribirán y la eficiencia con que se usará el espacio disponible en disco. Por otra parte, el formato de almacenamiento de datos también tiene una relación muy estrecha con el desempeño y el fácil uso de los mismos.

Hay dos formatos comúnmente usados en sistemas de almacenamiento de datos: archivos binarios y archivos de texto.

Los archivos binarios son aquéllos que contienen información que no necesariamente representan texto. Este tipo de archivo permite almacenar los datos ocupando menos espacio que los archivos de texto, pero tienen la desventaja de que no pueden ser vistos en aplicaciones de software comunes, por lo que deben ser traducidos por algún programa especial. Existen dos formas de escribir un archivo binario: *big-endian* y *little-endian*. En la primera forma, los números que ocupan más de un *byte* en memoria se almacenan del *byte* más significativo al menos significativo. Por ejemplo, el número binario 1010111010110110 ocupa dos *bytes* en memoria, por lo que el *byte* más significativo (10101110) se almacena en la primera dirección y el *byte* menos significativo (10110110) se almacena en la siguiente dirección más alta. En la segunda forma el orden es a la inversa, es decir, los números que ocupan más de un *byte* en memoria se almacenan del *byte* menos significativo al más significativo. Es importante considerar que para leer correctamente un archivo binario es necesario que se haga en la misma forma en que se escribió.

Los archivos de texto son aquéllos que contienen caracteres ASCII y tienen la ventaja de que casi cualquier computadora puede leerlos, sin necesidad de un software especial. Una desventaja es que ocupan más espacio en disco que los archivos binarios. Por ejemplo, en un archivo binario, el número -123.4567 se podría almacenar en 4 *bytes*, mientras que en un archivo de texto su representación tomaría 9 *bytes*, uno por cada carácter.

En sismología se utilizan tanto archivos binarios como archivos de texto para el registro de datos, pero se les suele dar un formato para su manejo, lo que implica agregar información adicional a los datos y arreglar todo el conjunto de una manera ordenada. En la actualidad existe un gran número de formatos para el manejo de datos sísmicos debido en gran parte a los diversos programas de procesamiento y a que cada fabricante de equipos sísmicos, suele tener uno propio. A pesar de que se ha intentado unificar los formatos al sistema de datos sísmicos unificados (SUDS: Seismic Unified Data System), no se ha tenido éxito debido a su relativa complejidad y a la falta de consenso para un formato común, que funcione en todas las plataformas de computadora.

En nuestro desarrollo en particular se hará uso del formato SAC, por ser el que utilizan los especialistas del Instituto de Ingeniería para el estudio de los microtemores.

Formato SAC

El formato SAC fue creado por el laboratorio nacional Lawrence Livermore para el almacenamiento de datos sísmicos. Este formato consta de un encabezado de longitud fija seguida por una o dos secciones de datos. El encabezado contiene campos de punto flotante, enteros y caracteres. El número de secciones de datos depende de si el archivo es o no igualmente espaciado. Los archivos igualmente espaciados contienen una sola sección de datos correspondiente a la variable dependiente. Los archivos de datos no igualmente espaciados tienen dos secciones de datos: la primera contiene la variable dependiente y la segunda la variable independiente, pero para el caso de archivos con datos espectrales (con representación en el dominio en la frecuencia), la primera sección contiene la amplitud o la componente real y la segunda sección contiene la fase o la componente imaginaria.

El formato SAC tiene dos formas de representación: binario y alfanumérico (texto).

Formato SAC binario

Este es el más utilizado y tiene el formato de un archivo binario, por lo que se puede leer rápidamente. El encabezado está formado por 158 palabras de 32 bits (4 *bytes*) de longitud, seguido por la(s) sección(es) de datos, éstas últimas con tantas palabras de 32 bits como número de puntos (NPTS) tenga la señal adquirida. La estructura de este formato se muestra en la tabla 2.6.

Sección de encabezado	Primera sección de datos	Segunda sección de datos
Palabra de inicio: 0	Palabra de inicio: 158	Palabra de inicio: 158+NPTS
Número de palabras: 158	Número de palabras: NPTS	Número de palabras: NPTS
Contenido: - Ver tabla 2.7	Contenido: - Variable dependiente - Amplitud - Componente real	Contenido: - Variable independiente - Fase - Componente imaginaria

Tabla 2.6. Estructura del formato SAC binario.

En la tabla 2.7 se presenta el contenido del encabezado SAC binario; en ella se muestran la palabra de inicio (P), el tipo de dato (T) y los nombres de las variables. La palabra de inicio es el número de palabra que le corresponde a la variable situada en la primer columna de cada renglón. Los tipos de datos de las variables son flotante (F), entero (I), lógico (L) y alfanumérico (K). Las variables de tipo flotante, entero y lógico utilizan 4 bytes (1 palabra) y las variables de tipo alfanumérico utilizan 8 bytes (2 palabras), excepto la variable KEVNM que utiliza 16 bytes (4 palabras). La mayoría de las variables tienen funciones específicas (ver tabla 2.9), excepto aquéllas que son internas (INTERNAL) y aquéllas que no se utilizan actualmente (UNUSED).

P	T	Nombres				
0	F	DELTA	DEPMIN	DEPMAX	SCALE	ODELTA
5	F	B	E	O	A	INTERNAL
10	F	T0	T1	T2	T3	T4
15	F	T5	T6	T7	T8	T9
20	F	F	RESP0	RESP1	RESP2	RESP3
25	F	RESP4	RESP5	RESP6	RESP7	RESP8
30	F	RESP9	STLA	STLO	STEL	STDP
35	F	EVLA	EVLO	EVEL	EVDP	MAG
40	F	USER0	USER1	USER2	USER3	USER4
45	F	USER5	USER6	USER7	USER8	USER9
50	F	DIST	AZ	BAZ	GCARC	INTERNAL
55	F	INTERNAL	DEPMEN	CMPAZ	CMPINC	XMINIMUM
60	F	XMAXIMUM	YMINIMUM	YMAXIMUM	UNUSED	UNUSED
65	F	UNUSED	UNUSED	UNUSED	UNUSED	UNUSED
70	I	NZYEAR	NZJDAY	NZHOUR	NZMIN	NZSEC
75	I	NZMSEC	NVHDR	NORID	NEVID	NPTS
80	I	INTERNAL	NWFID	NXSIZE	NYSIZE	UNUSED
85	I	IFTYPE	IDEP	IZTYPE	UNUSED	IINST
90	I	ISTREG	IEVREG	IEVTYP	IQUAL	ISYNTH
95	I	IMAGTYP	IMAGSRC	UNUSED	UNUSED	UNUSED
100	I	UNUSED	UNUSED	UNUSED	UNUSED	UNUSED
105	L	LEVEN	LPSPOL	LOVROK	LCALDA	UNUSED
110	K	KSTNM	KEVNM			
116	K	KHOLE	KO	KA		
122	K	KT0	KT1	KT2		
128	K	KT3	KT4	KT5		
134	K	KT6	KT7	KT8		
140	K	KT9	KF	KUSER0		
146	K	KUSER1	KUSER2	KCMPNM		
152	K	KNETWK	KDATRD	KINST		

Tabla 2.7. Encabezado SAC binario.

Formato SAC alfanumérico

Este formato es esencialmente el equivalente alfanumérico del formato SAC binario. En la tabla 2.8 se presenta la estructura del encabezado para este formato; en ella se muestran los números de tarjeta (NT), los formatos y los nombres de las variables utilizadas en esta sección. La información se organiza en renglones de texto denominados tarjetas. La sección del encabezado está contenido en las primeras 30 tarjetas. En las tarjetas del 1 al 14 se maneja el formato 5G15.7, que equivale a 5 columnas de datos flotantes con 15 dígitos significativos y 7 de precisión. En las tarjetas 15 a 22 se tiene el formato 5I10 que significa que hay 5 columnas de datos enteros de 10 dígitos. En la tarjeta 23 se especifican dos columnas de datos alfanuméricos, donde la primera tiene una longitud de 8 caracteres (A8) y la segunda tiene 16 caracteres (A16). Las tarjetas 24 a 30 están en formato 3A8 cuyo significado es 3 columnas con datos alfanuméricos de 8 caracteres. Finalmente, la(s) sección(es) de datos están en formato 5G15.7.

NT	Formato	Nombres				
01	(5G15.7)	DELTA	DEPMIN	DEPMAX	SCALE	ODELTA
02	(5G15.7)	B	E	O	A	INTERNAL
03	(5G15.7)	T0	T1	T2	T3	T4
04	(5G15.7)	T5	T6	T7	T8	T9
05	(5G15.7)	F	RESP0	RESP1	RESP2	RESP3
06	(5G15.7)	RESP4	RESP5	RESP6	RESP7	RESP8
07	(5G15.7)	RESP9	STLA	STLO	STEL	STDP
08	(5G15.7)	EVLA	EVLO	EVEL	EVDP	MAG
09	(5G15.7)	USER0	USER1	USER2	USER3	USER4
10	(5G15.7)	USER5	USER6	USER7	USER8	USER9
11	(5G15.7)	DIST	AZ	BAZ	GCARC	INTERNAL
12	(5G15.7)	INTERNAL	DEPMEN	CMPAZ	CMPINC	XMINIMUM
13	(5G15.7)	XMAXIMUM	YMINIMUM	YMAXIMUM	ADJTM	UNUSED
14	(5G15.7)	UNUSED	UNUSED	UNUSED	UNUSED	UNUSED
15	(5I10)	NZYEAR	NZJDAY	NZHOURL	NZMIN	NZSEC
16	(5I10)	NZMSEC	NVHDR	NORID	NEVID	NPTS
17	(5I10)	NSPTS	NWFID	NXSIZE	NYSIZE	UNUSED
18	(5I10)	IFTYPE	IDEP	IZTYPE	UNUSED	IINST
19	(5I10)	ISTREG	IEVREG	IEVTYP	IQUAL	ISYNTH
20	(5I10)	IMAGTYP	IMAGSRC	UNUSED	UNUSED	UNUSED
21	(5I10)	UNUSED	UNUSED	UNUSED	UNUSED	UNUSED
22	(5I10)	LEVEN	LPSPOL	LOVROK	LCALDA	UNUSED
23	(A8,A16)	KSTNM	KEVNM			
24	(3A8)	KHOLE	KO	KA		
25	(3A8)	KT0	KT1	KT2		
26	(3A8)	KT3	KT4	KT5		
27	(3A8)	KT6	KT7	KT8		
28	(3A8)	KT9	KF	KUSER0		
29	(3A8)	KUSER1	KUSER2	KCMPNM		
30	(3A8)	KNETWK	KDATRD	KINST		

Tabla 2.8. Encabezado SAC alfanumérico.

Variables del encabezado

En la tabla 2.9 se enlistan las características de las variables del encabezado SAC, sus tipos y descripciones. Las variables están agrupadas por categoría: campos requeridos y de tiempo, selecciones de fase, parámetros del instrumento, parámetros de la estación, parámetros del evento y misceláneos.

Campos requeridos y de tiempo		
Nombre	Tipo	Descripción
NPTS	N	Número de puntos por componente de datos [requerido]
NVHDR	N	Número de versión del encabezado. El valor actual es el entero 6. Versiones anteriores (NVHDR < 6) se actualizan automáticamente cuando se leen en SAC [requerido]
B	F	Valor de inicio de la variable independiente [requerido]
E	F	Valor de fin de la variable independiente [requerido]
IFTYPE	I	Tipo de archivo [requerido]: = ITIME { Archivo de series de tiempo } = IRLIM { Archivo espectral---real e imaginario } = IAMPH { Archivo espectral---amplitud y fase } = IXY { Datos generales X contra Y } = IXYZ { Archivo general XYZ (3-D) }
LEVEN	L	Verdadero si los datos son igualmente espaciados [requerido]
DELTA	F	Incremento entre muestras igualmente espaciadas (valor nominal) [requerido]
ODELTA	F	Incremento observado si es diferente del valor nominal
IDEP	I	Tipo de variable dependiente: = IUNKN (Desconocido) = IDISP (Desplazamiento en nm) = IVEL (Velocidad en nm/sec) = IVOLTS (Velocidad en volts) = IACC (Aceleración en nm/sec ²)
SCALE	F	Factor de escala para la variable dependiente [no usado actualmente]
DEPMIN	F	Valor mínimo de la variable dependiente
DEPMAX	F	Valor máximo de la variable dependiente
DEPMEN	F	Valor medio de la variable dependiente
NZYEAR	N	Año GMT
NZJDAY	N	Día juliano GMT
NZHOUR	N	Hora GMT
NZMIN	N	Minuto GMT
NZSEC	N	Segundo GMT
NZMSEC	N	Milisegundo GMT
IZTYPE	I	Equivalencia del tiempo de referencia: = IUNKN (Desconocido) = IB (Tiempo de inicio) = IDAY (Medianoche del día GMT de referencia) = IO (Tiempo de origen del evento) = IA (Primer tiempo de arribo) = ITn (Selección de tiempo definido por el usuario n, n=0,9)
O	F	Tiempo de origen del evento (segundos relativos a la referencia de tiempo)
KO	A	Identificación del tiempo de origen del evento

Tabla 2.9. Variables del encabezado SAC. (Continúa)

Selecciones de fase		
A	F	Primer tiempo de arribo (segundos relativos a la referencia de tiempo)
KA	K	Identificación del primer tiempo arribo
F	F	Tiempo final del evento (segundos relativos a la referencia de tiempo)
KF	A	Identificación del tiempo final
T _n	F	Selecciones o marcas de tiempo definidas por el usuario, { _{ai n} }=0,9 (segundos relativos a la referencia de tiempo)
KT{ _{ai n} }	K	Identificaciones de las selecciones de tiempo definidas por el usuario, { _{ai n} }=0,9
Campos del instrumento		
KINST	K	Nombre genérico del instrumento de grabado
IINST	I	Tipo de instrumento de grabado [no usado actualmente]
RESP _n	F	Parámetros de respuesta del instrumento, n=0,9 [no usado actualmente]
Campos de la estación		
KNETWK	K	Nombre de la red sísmica
KSTNM	K	Nombre de la estación
ISTREG	I	Región geográfica de la estación [no usado actualmente]
STLA	F	Latitud de la estación (grados, norte positivo)
STLO	F	Longitud de la estación (grados, este positivo)
STEL	F	Elevación de la estación (metros) [no usado actualmente]
STDP	F	Profundidad de la estación por debajo de la superficie (metros) [no usado actualmente]
CMPAZ	F	Azimut de la componente (grados en dirección de las manecillas del reloj del norte)
CMPINC	F	Ángulo de incidencia de la componente (grados de la vertical)
KCMPNM	K	Nombre de la componente
KSTCMP	A	Componente de la estación, derivado de KSTNM, CMPAZ y CMPINC
LPSPOL	L	Verdadero si las componentes de la estación tienen polaridad positiva (regla de la mano izquierda)
Campos del evento		
KEVNM	K	Nombre del evento
IEVREG	I	Región geográfica del evento [no usado actualmente]
EVLA	F	Latitud del evento (grados, norte positivo)
EVLO	F	Longitud del evento (grados, este positivo)
EVEL	F	Elevación del evento (metros) [no usado actualmente]
EVDP	F	Profundidad del evento por debajo de la superficie (metros) [no usado actualmente]
MAG	F	Magnitud del evento
IMAGTYP	I	Tipo de magnitud: = IMB (Magnitud de onda corporal) = IMS (Magnitud de onda superficial) = IML (Magnitud local) = IMW (Magnitud del momento) = IMD (Magnitud de duración) = IMX (Magnitud definida por el usuario)

Tabla 2.9. Variables del encabezado SAC. (Continúa)

IMAGSRC	I	Fuente de información de la magnitud: = INEIC (Centro de información nacional de terremotos) = IPDE (Determinación preliminar del epicentro) = IISC (Centro sismológico internacional) = IREB (Comunicado revisado del evento) = IUSGS (US Medición geológica) = IBRK (UC Berkeley) = ICALTECH (Instituto Tecnológico de California) = ILLNL (Laboratorio Nacional de Lawrence Livermore) = IEVLOC (Lugar del evento (programa de computadora)) = IJSOP (Programa de observación sísmico conjunto) = IUSER (El individuo usando SAC2000) = IUNKNOWN (Desconocido)
IEVTYP	I	Tipo de evento: = IUNKN (Desconocido) = INUCL (Evento nuclear) = IPREN (Evento de disparo nuclear) = IPOSTN (Evento de postdisparo nuclear) = IQUAKE (Terremoto) = IPREQ (Premonitor) = IPOSTQ (Réplica) = ICHEM (Explosión química) = IQB (Explosión de mina confirmada) = IQB1 (Explosión de mina con disparo diseñado) = IQB2 (Explosión de mina con disparo observado) = IQBX (Explosión de mina – disparo solo) = IQMT (Eventos inducidos de minería: tremores y reventones de roca) = IEQ (Terremoto) = IEQ1 (Terremotos en una secuencia de réplicas) = IEQ2 (Terremoto sentido) = IME (Explosión marina) = IEX (Otra explosión) = INU (Explosión nuclear) = INC (Colapso de cavidad nuclear) = IO_ (Otra fuente de origen conocido) = IL (Evento local de origen desconocido) = IR (Evento regional de origen desconocido) = IT (Evento telesísmico de origen desconocido) = IU (Indeterminado o información confusa) = IOTHER (Otro)
NEVID	N	Identificación del evento(CSS 3.0)
NORID	N	Identificación de origen (CSS 3.0)
NWFID	N	Identificación de la forma de onda (CSS 3.0)
KHOLE	k	Identificación del hoyo si es un evento nuclear
DIST	F	Distancia de la estación al evento (km)
AZ	F	Azimut del evento a la estación (grados)
BAZ	F	Azimut de la estación al evento (grados)
GCARC	F	Longitud de la estación al arco del círculo grande del evento (grados)
Campos misceláneos		
LCALDA	L	Verdadero si DIST, AZ, BAZ, y GCARC van a ser calculados de la estación y las coordenadas del evento

Tabla 2.9. Variables del encabezado SAC. (Continúa)

IQUAL	I	Calidad de los datos [no usado actualmente]: = IGOOD (Datos buenos) = IGLCH (<i>Glitches</i>) = IDROP (<i>Dropouts</i>) = ILOWSN (Señal de baja relación señal a ruido) = IOTHER (Otro)
ISYNTH	I	Bandera de datos artificiales [no usado actualmente]: = IRLDTA (Datos verdaderos) = ????? (Banderas para varios códigos de sismogramas artificiales)
KDATRD	K	Fecha de los datos leídos en la computadora
USER{\ai n}	F	Área de almacenamiento variable definida por el usuario, {\ai n}=0,9
KUSER{\ai n}	K	Área de almacenamiento definida por el usuario, {\ai n}=0,2
LOVROK	L	Verdadero si esta permitido sobrescribir este archivo
NXSIZE	N	Longitud espectral (Sólo archivos espectrales)
NYSIZE	N	Ancho espectral (Sólo archivos espectrales)
XMINIMUM	F	Valor mínimo de X (Sólo archivos espectrales)
XMAXIMUM	F	Valor máximo de X (Sólo archivos espectrales)
YMINIMUM	F	Valor mínimo de Y (Sólo archivos espectrales)
YMAXIMUM	F	Valor máximo de Y (Sólo archivos espectrales)

Tabla 2.9. Variables del encabezado SAC.

La tabla 2.10 enlista los tipos de datos del encabezado SAC, sus definiciones, el valor especial usado para indicar que una variable particular está indefinida y su descripción.

Tipo	Definición	Indefinido	Descripción
F	Flotante	-12345.0	Precisión simple
N	Entero	-12345	El nombre de la variable comienza con la letra N
I	Enumerado	-12345	El nombre de la variable comienza con la letra I. Tiene un conjunto limitado de valores enteros, donde cada valor tiene su nombre y representa una condición específica
L	Lógico	-12345	El nombre de la variable empieza con la letra L. El valor puede ser verdadero o falso
K	Alfanumérico	"-12345"	El nombre de la variable empieza con la letra K. Tiene una longitud de 8 o 16 caracteres

Tabla 2.10. Tipos de datos del encabezado SAC.

En la siguiente tabla se dan los valores de los campos enumerados del encabezado.

Nombre	Valor	Nombre	Valor	Nombre	Valor	Nombre	Valor	Nombre	Valor
itime	01	it6	19	inucl	37	imw	55	iqbx	73
irlim	02	it7	20	ipren	38	imd	56	iqmt	74
iamph	03	it8	21	ipostn	39	imx	57	ieq	75
ixy	04	it9	22	iquake	40	ineic	58	ieq1	76
iunkn	05	iradnv	23	ipreq	41	ipde	59	ieq2	77
idisp	06	itannv	24	ipostq	42	iisc	60	ime	78
ivel	07	iradev	25	ichem	43	ireb	61	iex	79
iacc	08	itanev	26	iother	44	iusgs	62	inu	80
ib	09	inorth	27	igood	45	ibrk	63	inc	81
iday	10	ieast	28	iglch	46	icaltech	64	io_	82

Tabla 2.11. Valores de los campos enumerados. (Continúa)

io	11	ihorza	29	idrop	47	illnl	65	il	83
ia	12	idown	30	ilowsn	48	ievloc	66	ir	84
it0	13	iup	31	irdta	49	ijsop	67	it	85
it1	14	illbb	32	ivolts	50	iuser	68	iu	86
it2	15	iwwsn1	33	ixyz	51	iunknown	69		
it3	16	iwwsn2	34	imb	52	iqb	70		
it4	17	ihglp	35	ims	53	iqb1	71		
it5	18	isro	36	iml	54	iqb2	72		

Tabla 2.11. Valores de los campos enumerados.

2.3. La instrumentación virtual

Cuando se habla de instrumentos de medida, es normal pensar en una carcasa rígida, en la que se destaca su panel frontal lleno de botones, *leds* y demás tipos de controles y visualizadores. En la cara oculta del panel están los contactos de esos controles que los unen físicamente con la circuitería interna. Esta circuitería interna se compone de circuitos integrados y otros elementos que procesan las señales de entrada en función del estado de los controles, devolviendo el resultado a los correspondientes visualizadores del panel frontal.

Un instrumento virtual es un módulo de *software* que simula el panel frontal del instrumento como el descrito previamente, que apoyado en elementos de *hardware* accesibles a la computadora como tarjetas de adquisición de datos, tarjetas DSP e instrumentos accesibles vía GPIB, VXI, RS232, USB o ethernet, realiza una serie de medidas como si se tratase de un instrumento real. De este modo, cuando se ejecuta un programa que funciona como instrumento virtual (VI: Virtual Instrument), el usuario ve en la pantalla de la computadora un panel cuya función es idéntica a la de un instrumento físico, facilitando la visualización y el control del aparato. A partir de los datos reflejados en el panel frontal, el VI actúa recolectando o generando señales, como lo haría su homólogo físico.

El control de instrumentación por computadora no es nuevo, su uso en sistemas de medición se hacía desde los años setenta mediante el estándar GPIB. Pero fue hasta los años noventa cuando los procesadores de 16 y 32 bits se incorporaron a equipos accesibles, consiguiendo velocidades altas y capacidades grandes de memoria. Esta popularización de computadoras de altas prestaciones ha traído consigo un fuerte desarrollo de paquetes de software que simplifican la creación de aplicaciones.

Hasta hace poco, la tarea de construcción de un VI se llevaba a cabo con paquetes de software que ofrecían una serie de facilidades, como funciones de alto nivel y la incorporación de elementos gráficos, que simplificaban la tarea de programación y elaboración del panel frontal. Sin embargo, el cuerpo del programa se seguía basando en texto, lo que suponía mucho tiempo invertido en detalles de programación que nada tienen que ver con la finalidad de un VI. Con la llegada del software de programación gráfica LabVIEW de National Instruments, Visual Designer de Burr Brown y VEE de Agilent Technology, el proceso de creación de un VI se ha simplificado notablemente, minimizando el tiempo de desarrollo de aplicaciones.

La programación gráfica en el entorno de LabVIEW

Cuando se crea un VI en LabVIEW se trabaja con dos ventanas: una en la que se implementa el panel frontal y otra que soporta el nivel de programación, conocido como diagrama de bloques.

El panel frontal (figura 2.41) se construye con base en controles e indicadores, los cuales no son más que las terminales de entrada y salida, respectivamente, del VI. Como controles se puede tener *knobs* y *dials* (botones rotatorios), *push buttons* (pulsadores) y otros dispositivos de entrada. Como indicadores se tienen gráficas, *leds* y otros visualizadores. Los controles simulan elementos de entrada al instrumento y proporcionan datos al diagrama de bloques. Los indicadores simulan elementos de salida del instrumento y visualizan los datos que el diagrama de bloques adquiere o genera.

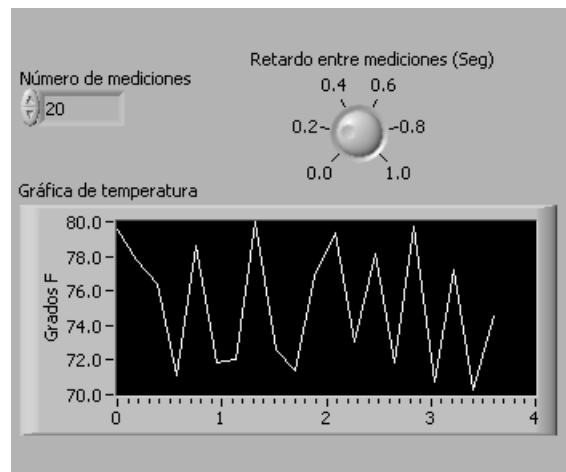


Figura 2.41. Ejemplo de un panel frontal.

Una vez construido el panel frontal, se desarrolla el código fuente usando unas representaciones gráficas de funciones que controlarán los objetos del panel frontal. Los objetos del panel frontal aparecen como terminales en el diagrama de bloques (figura 2.42) los cuales se conectan a bloques funcionales con entradas y salidas mediante cables ficticios por donde fluyen los datos.

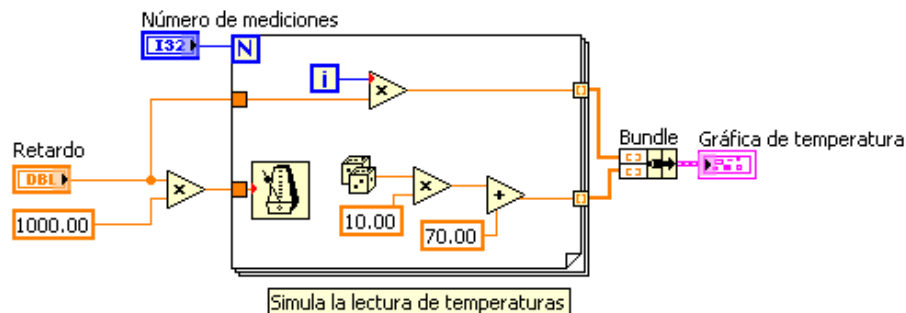


Figura 2.42. Ejemplo de un diagrama de bloques.

3. DESARROLLO DEL SISTEMA

En este capítulo se describe la forma en que se implementó la solución al problema planteado en el capítulo 1. Primero se describirá brevemente los requerimientos que debe cumplir la solución, esto con la intención de conocer los objetivos concretos del desarrollo. Después, se comentarán los detalles del *hardware* utilizado para la adquisición de datos. Finalmente, se abordará la parte del *software*, donde se mencionarán las partes en las que se dividió la aplicación principal, las tareas específicas que cada parte desempeña por separado y el funcionamiento en conjunto.

3.1. Requerimientos generales

El propósito principal del sistema es facilitar las pruebas de adquisición de los datos provenientes de una unidad sísmica, para posteriormente efectuar un procesamiento y determinar la estructura de las capas superficiales del terreno. Para cumplir con dicho propósito, los especialistas en sismología del Instituto de Ingeniería cuentan con el *hardware* (unidad sísmica SR04) para recolectar los datos y transmitirlos a una computadora. Sin embargo, como se planteó en el capítulo 1, se requiere del desarrollo de un *software* que simplifique la adquisición y el procesamiento de los datos. Así, con base a las características del *hardware* y el conocimiento de los detalles de las pruebas que se efectúan, se estableció que el *software* debería cumplir específicamente con los siguientes requerimientos:

- Posibilidad de configurar una o varias unidades sísmicas.
- Configurar la forma en que se almacenarán los datos de las unidades sísmicas.
- Adquirir los datos de las unidades sísmicas configuradas y de manera simultánea graficarlos y guardarlos en archivos con formato SAC.
- Leer el contenido de los archivos después de la adquisición de datos, esto con la finalidad de verificar que la información se haya guardado correctamente.
- Procesar los archivos adquiridos usando el método SPAC.

3.2. La unidad sísmica SR04

La unidad sísmica SR04 es un instrumento producido por la compañía italiana SARA electronic instruments, con todos los componentes necesarios para convertir una señal sísmica analógica a su forma digital y grabarla usando una computadora. Esta unidad consta de una caja metálica donde se integran tres sensores sísmicos y dos tarjetas electrónicas. Los sensores son geófonos modelo GS-11D y cada uno de éstos mide una de las tres componentes de movimiento (x,y,z). Una de las tarjetas es la SADC20, la cual lleva

a cabo la conversión analógica a digital, mientras que la otra es la denominada GPSDCF, la cual consiste en un receptor GPS utilizado para establecer la referencia de tiempo exacto.

La unidad sísmica SR04 está provista de una antena con 10 metros de cable, la cual se conecta a la GPSDCF; un cable RS232 para la conexión con la computadora y un cable para la alimentación de energía, proporcionada por una batería o un eliminador de 12V. En la figura 3.1 se puede apreciar la unidad SR04 y sus componentes.

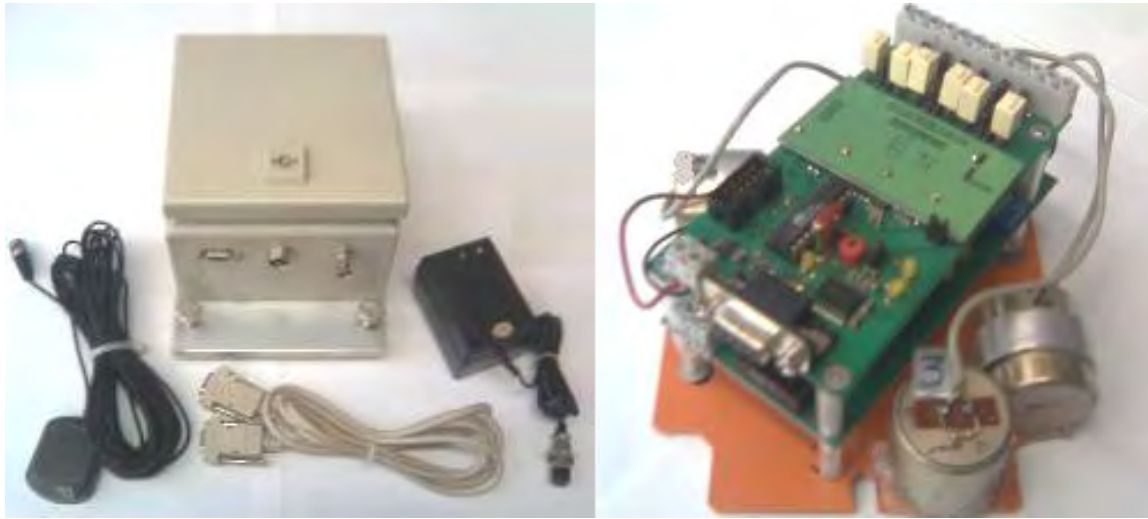


Figura 3.1. Unidad sísmica SR04.

3.2.1. El geófono GS-11D

El geófono GS-11D es un sensor de tipo electromagnético, construido por la compañía Geo Space. La estructura de este geófono es la de un cilindro metálico, en donde se aloja un imán y una bobina sostenida por un resorte (ver figura 3.2). Además, cuenta con dos contactos de salida plateados, los cuales aseguran una conexión eléctrica positiva y entregan la medición de velocidad. Este sensor está disponible para la medición de la componente vertical (VT) y la componente horizontal (H) de movimiento.

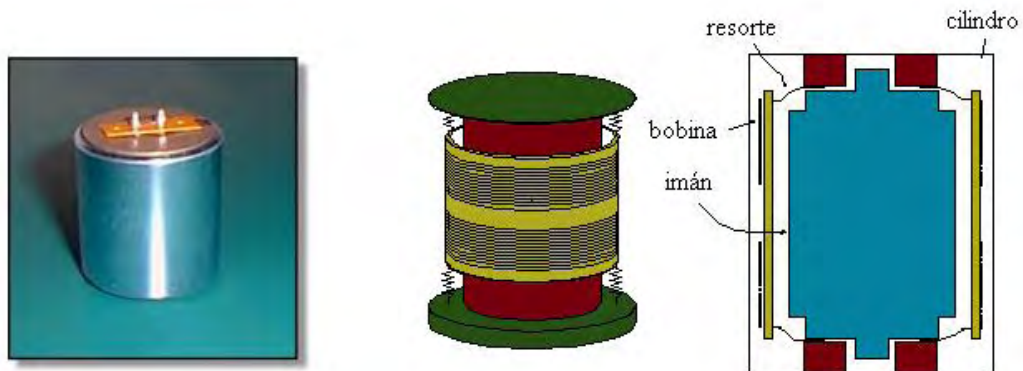


Figura 3.2. Geófono GS-11D.

Las especificaciones generales del GS-11D son:

- Frecuencia natural: $4.5 \pm .75$ Hz.
- Resistencia de la bobina: 4000Ω a 25°C .
- Sensibilidad de voltaje: 2.540 V/in/seg (1 V/cm/seg).
- Masa móvil: 23.6 gr.
- Dimensiones (altura x diámetro x peso): 1.32 in (3.35 cm) x 1.25 in (3.18 cm) x 3.9oz (111 gr).

La curva de respuesta de velocidad proporcionada por el fabricante se muestra en la figura 3.3. Se especifica que para obtener un amortiguamiento del 35% (curva A), se deben dejar libres los contactos de salida, pero para un amortiguamiento de 50% (curva B) y 70% (curva C), se debe conectar un resistor de 47500Ω y 18200Ω , respectivamente, en los contactos de salida.

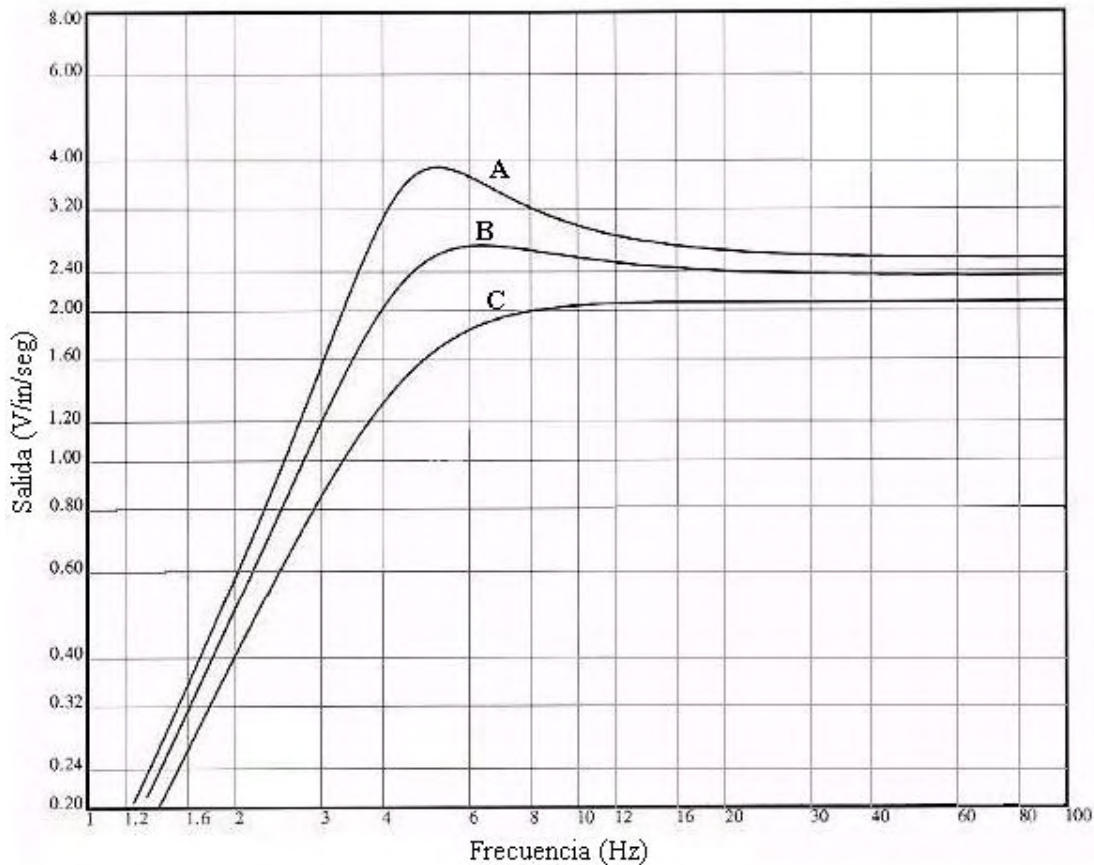


Figura 3.3. Curva de respuesta del geófono GS-11D.

3.2.2. La tarjeta SADC20

La tarjeta SADC20 (figura 3.4) es una tarjeta de conversión analógica digital de 24 bits, diseñada para ofrecer altas prestaciones en aplicaciones sísmicas, con una de las mejores relaciones costo-calidad disponible en el mercado.

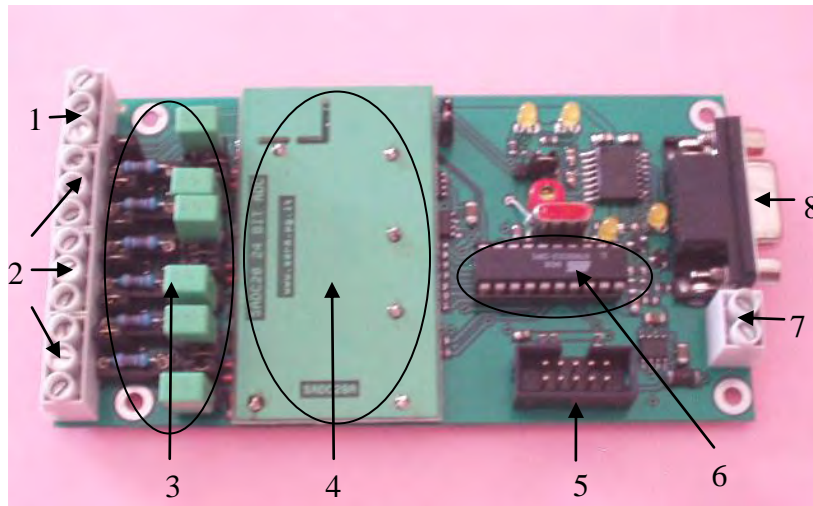


Figura 3.4. Tarjeta SADC20.

Las partes que en general constituyen la SADC20 son:

- 1) Una entrada para la recepción de la referencia de tiempo, proveniente de la tarjeta GPSDCF.
- 2) Tres entradas analógicas (canales) para la conexión de un amplio rango de sensores sísmicos, abarcando desde geófonos hasta acelerómetros. Cada canal puede ser configurado para aceptar señales diferenciales unipolares o señales diferenciales bipolares, esto se logra cambiando la posición de algunos *jumpers*. Cabe destacar que en modo diferencial unipolar la impedancia de entrada es $8k\Omega$ y en modo diferencial bipolar la impedancia de entrada es del orden de $300 k\Omega$.
- 3) Un arreglo de filtros RC paso-bajas por canal, cuyas frecuencias de corte se pueden ajustar a 8.8, 19 y 41 Hz, reemplazando los capacitores de entrada. Estos filtros tienen la función de evitar el fenómeno de *aliasing*.
- 4) Un conversor sigma-delta de 24 bits por canal, cuya frecuencia de muestreo se puede ajustar a 10, 20, 25, 50, 100 y 200 muestras por segundo (sps: samples per second). Cada conversor acepta un rango de voltaje de ± 1 V, por lo que el valor más pequeño detectable es $2V/2^{24}=119$ nV, equivalente a una cuenta. Además, el fabricante especifica que a 100 sps se alcanza una resolución de 22 bits rms y a 25 sps se alcanza una resolución de 24 bits rms, lo cual es equivalente a un rango dinámico de 132 dB y 144 dB, respectivamente.
- 5) Un conector para programación de circuitos (ISP: In System Programming) para poder actualizar el *firmware* del microcontrolador, esta actualización únicamente la puede realizar el fabricante.
- 6) Un microcontrolador programado para ejecutar las siguientes funciones:

- a) Recibir la señal de tiempo enviada por la tarjeta GPSDCF, en caso de que esté en sincronía y mantener actualizado el reloj en tiempo real implementado en el microcontrolador.
 - b) Recibir los datos enviados por los conversores, estamparlos con su referencia de tiempo y organizarlos de acuerdo al protocolo de comunicación del fabricante.
 - c) Establecer la comunicación con la computadora a través del estándar RS232, para el envío de datos y la recepción de comandos de configuración.
- 7) Una entrada protegida contra inversión de polaridad para la conexión de la alimentación de energía, cuyo rango abarca de 8 a 12 V.
 - 8) Un conector DB9 para la comunicación RS232. En este dispositivo las terminales que se utilizan son recepción de datos (Rx), transmisión de datos (Tx) y tierra (Gnd).

Por otra parte, se tiene el protocolo de comunicación, que comprende la manera estándar en la que se debe llevar a cabo la transmisión de datos entre la SADC20 y la computadora. Los aspectos más importantes que se consideran en la transmisión de datos son la configuración del puerto, la decodificación de los datos y el envío de comandos. En los apartados que siguen se tratarán cada uno de estos.

Configuración del puerto

La comunicación que se lleva a cabo entre la SADC20 y la computadora es serial y bidireccional. En cuanto al puerto de comunicación, éste debe ser configurado para una velocidad de transmisión de 38400 baudios, sin *handshake*, 8 bits de datos, 1 bit de paro y sin paridad.

Decodificación de datos

La SADC20 transmite en paquetes de 9 *bytes* los datos del tiempo absoluto y en paquetes de 5 *bytes* los datos de cada uno de los canales. En estos paquetes, el primer *byte* es un identificador cuyo valor es mayor o igual a 128 decimal (0x80 hexadecimal) y sirve para distinguir si se trata de los datos de algún canal o los datos del tiempo. El último *byte* indica el fin de paquete y siempre tiene un valor mayor a 240 (0xF0). Los demás *bytes* del paquete son valores menores a 128 (0x80) y contienen los datos sin tratar. En la figura 3.5 se observa la forma en la que acomodan los paquetes, suponiendo que se estuviera transmitiendo a una frecuencia de n muestras por segundo.

Paquete de tiempo

En el paquete de tiempo, el primer *byte* es el identificador, cuyo valor es 129 (0x81), los seis *bytes* siguientes contienen la fecha y la hora, el *byte* extra contiene información del estado del receptor GPS y el *byte* 0xFF indica el fin de paquete. El *byte* extra/fin está codificado de la siguiente manera:

- Bit0 Reservado
- Bit1 Reservado
- Bit2 Reservado
- Bit3 Detecta la información del receptor GPS
- Bit4 Reservado
- Bit5 Sincronía recibida (permanece en 1 por 6 segundos)
- Bit6 Reservado
- Bit7 Reservado

Una consideración importante que se debe tener en cuenta es que al encender la SADC20, la fecha y hora son aleatorias, excepto el mes que es igual a cero. Es por esta razón que el *software* de grabado de datos debe primero estampar éstos con el tiempo que tiene la computadora. Después, cuando la tarjeta reciba datos coherentes de la GPSDCF, el *byte* del mes será diferente de cero, lo que indicará al *software* de grabado que la SADC20 está transmitiendo los datos de tiempo correcto.

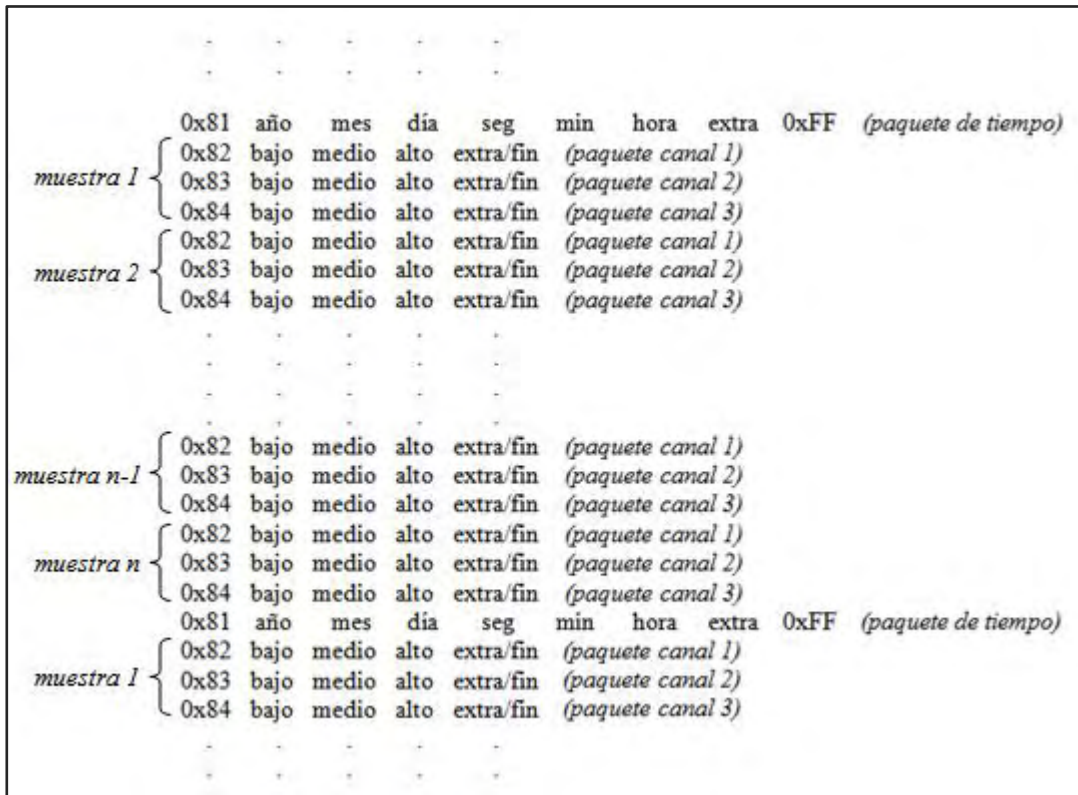


Figura 3.5. Organización de los datos transmitidos por la SADC20.

Paquete de datos por canal

En los paquetes de los canales el primer *byte* es el identificador del canal, por lo que los valores 0x82, 0x83 y 0x84 corresponden a los canales 1, 2 y 3, respectivamente. Los tres *bytes* siguientes (bajo, medio y alto) contienen el valor de la muestra de cada canal, pero necesitan ser completados porque se transmiten sin el bit número 7 (contando los bits del 0 al 7). El *byte* extra/fin indica el fin del paquete y contiene información para completar

el bit siete de los *bytes* bajo, medio y alto. Este *byte* extra/fin se encuentra codificado como sigue:

Bit0 bit número 7 del *byte* bajo
Bit1 bit número 7 del *byte* medio
Bit2 bit número 7 del *byte* alto
Bit3 siempre 1
Bit4 siempre 1
Bit5 siempre 1
Bit6 siempre 1
Bit7 siempre 1

Para decodificar las muestras de los canales, el fabricante proporciona el siguiente algoritmo implementado en lenguaje Basic:

```
` Ejemplo que asume que
` bajo = byte más bajo de los 24 bits
` medio = byte medio de los 24 bits
` alto = byte más alto de los 24 bits
` bits = bits transmitidos en el byte extra/fin
` tmp = valor temporal
` valor = variable que contiene el valor decodificado
`
` Primero completa los bytes bajo y medio
bajo = bajo + (bits And 1) * 128
medio = medio + (bits And 2) * 64
` Después calcula el valor absoluto
tmp = (alto * 65536 + medio * 256 + bajo)
` Finalmente aplica el signo
IF bits And 4 THEN
valor = -8388608 + tmp
ELSE
valor = tmp
END IF
```

Envío de comandos

La computadora puede enviar comandos a la SADC20 para obtener la versión del *firmware* y el contenido de la EEPROM o para establecer parámetros como el tiempo, la fecha, la frecuencia de muestreo, la compensación del reloj y correcciones al tiempo GMT. Estos comandos están formados por 6 *bytes*, donde el primer *byte* especifica la operación a realizar y siempre es mayor a 128 (0x80), mientras que los *bytes* restantes son los parámetros propios de cada comando. Los detalles de cada comando son:

Versión del firmware

Sintaxis del comando: 0x81 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00

Este comando es necesario para conocer la versión del firmware de la tarjeta. Para la SADC20 la versión actual es la 2.00, por lo que al enviar el comando se espera que la respuesta sea V200 (en código ASCII).

Corrección del tiempo GMT

Sintaxis del comando: 0x82 GMT 0x00 0x00 0x00 0x00

La SADC20 puede recibir la referencia de tiempo de cualquier fuente DCF77 real o emulada. Entiéndase como fuente real a un radio DCF77 y como fuente emulada a un receptor GPS que convierte sus datos a DCF77. Considerando que el DCF77 siempre se transmite con un tiempo de corrimiento de +1 (tiempo local de Alemania), se debe siempre aplicar una corrección de -1 para obtener el tiempo UTC. Para el caso de una fuente emulada como la tarjeta GPSDCF, el tiempo se recibe ya corregido por lo que se debe aplicar una corrección de 0.

En el envío del comando, el parámetro GMT se debe dar en formato complemento a dos y con valores en el rango de -23 a +23. De esta manera, si la corrección es positiva se puede enviar 1, 2 o 3 y así sucesivamente, pero si la corrección es negativa, se puede enviar por ejemplo -1 (255 en complemento a dos) o -2 (254 en complemento a dos). Si el comando ha sido recibido correctamente, la tarjeta responde enviando el *byte* 248 (0xF8).

Ajuste del tiempo

Sintaxis del comando: 0x83 seg min hora 0x00 0x00

Este comando ajusta el tiempo del reloj de la SADC20. Los parámetros que ajusta son los segundos, minutos y horas, los cuales deben mandarse en binario y no en BDC o ASCII. Si se recibió el comando correctamente, la tarjeta responde enviando el *byte* 248 (0xF8).

Ajuste de la fecha

Sintaxis del comando: 0x87 año mes día 0x00 0x00

El comando de ajuste de fecha permite modificar el año, el mes y el día del reloj de la SADC20. Las consideraciones para el envío de los parámetros de ajuste, son las mismas que para el tiempo e igualmente se recibe el *byte* 248 (0xF8) cuando se tiene éxito en la operación.

Ajuste de la frecuencia de muestreo

Sintaxis del comando: 0x84 sps1 sps2 sps3 0x00 0x00

Este comando permite establecer la frecuencia a la que muestreará la SADC20 las señales de entrada. Los *bytes* sps1, sps2 y sps3 del comando, corresponden a las frecuencias de muestreo que se programarán en los canales 1, 2 y 3, respectivamente. La manera en que

se especifica dicha frecuencia, es utilizando la fórmula $spsX=200/(\text{frecuencia requerida})$, de tal forma que si se necesitara una frecuencia de 100 Hz el valor de $spsX$ sería $200/100=2$. Sin embargo, debe hacerse notar que no es posible programar los canales a diferentes frecuencias y que una vez establecido este parámetro, se mantiene en la memoria de la tarjeta, aún si ésta se apaga.

Lectura de la EEPROM

Sintaxis del comando: 0x86 dirección 0x00 0x00 0x00 0x00

Con este comando se pueden obtener algunos de los parámetros que se han establecido en la tarjeta y que se almacenan en la EEPROM. Los parámetros almacenados son la corrección del tiempo GMT y la frecuencia de muestreo de los canales. La dirección de cada uno de ellos se indica en el siguiente mapa de memoria:

- 0x00 corrección del tiempo GMT
- 0x05 frecuencia de muestreo del canal 1
- 0x06 frecuencia de muestreo del canal 2
- 0x07 frecuencia de muestreo del canal 3

Si el comando se reconoce correctamente, la tarjeta responde con un solo *byte*, conteniendo el dato encontrado en la dirección especificada de la EEPROM.

3.2.3. La tarjeta GPSDCF

La tarjeta GPSDCF (figura 3.6) convierte las señales de tiempo de un receptor GPS en pulsos codificados de acuerdo con el estándar DCF77.

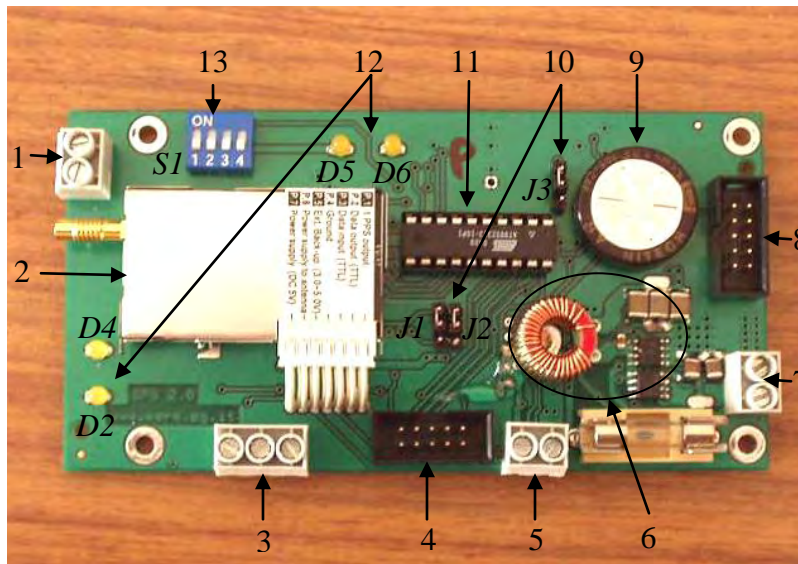


Figura 3.6. Tarjeta GPSDCF.

Las partes que en general constituyen la GPSDCF son:

- 1) Una salida para el envío de pulsos en formato DCF77. Esta salida puede manejar como máximo una carga de 5mA.
- 2) Un receptor GPS utilizado para recoger las señales provenientes de una red de satélites y determinar la localización y el tiempo exacto. Este receptor tiene una entrada para la conexión de una antena y un grupo de siete terminales para conectarlo a la tarjeta GPSDCF. Las siete terminales del conector son: salida PPS, salida de datos, entrada de datos, tierra, batería de respaldo, fuente de energía de la antena y fuente de energía del receptor (5V).

El consumo de potencia de la tarjeta cuando el receptor GPS está en operación es de 1W y cuando está en modo de ahorro de energía el consumo es de 300mW.

- 3) Un conector de tres terminales. La terminal de la derecha es la tierra, la terminal del centro es una salida de 5V para la alimentación de una carga externa y la terminal de la izquierda es una línea auxiliar para habilitar (abierta) o deshabilitar la salida de 5V (conectada a tierra).
- 4) Un conector ISP para la actualización del *firmware* del microcontrolador, esta actualización únicamente la puede realizar el fabricante.
- 5) Una salida de voltaje dependiente del voltaje de alimentación de la tarjeta. Esta salida sirve para alimentar a otro dispositivo y está protegida con un fusible de 1A.
- 6) Una fuente conmutada de 5V a 2A, para la alimentación del receptor GPS y de alguna carga externa.
- 7) Una entrada para la alimentación de la tarjeta. El rango de voltajes que acepta la tarjeta es de 8 a 16 V.
- 8) Un conector ISP para la conexión de la tarjeta a una computadora o a un receptor GPS externo usando la interfaz RS232. Para la conexión con una computadora se utiliza un cable RS232, pero para la conexión de un receptor GPS externo se debe hacer un cable de acuerdo con las especificaciones del receptor utilizado. El fabricante proporciona un adaptador ISP-DB9, donde las señales del conector DB9 son:

1. PPS de salida del receptor GPS interno
2. Señal de transmisión de datos (Tx) del receptor GPS interno o externo
3. Señal de recepción de datos (Rx) del receptor GPS interno o externo
4. Sin conexión
5. Tierra
6. Sin conexión
7. Sin conexión
8. Sin conexión
9. PPS de entrada del receptor GPS externo

9) Una batería de respaldo de 5V.

10) Un grupo de *jumpers* para definir el modo de operación de la tarjeta:

<i>J1</i>	1-2= entrada de PPS normal	2-3= entrada de PPS invertida
<i>J2</i>	1-2= salida de PPS normal	2-3= salida de PPS invertida
<i>J3</i>	1-2= receptor GPS interno	2-3= receptor GPS externo

11) Un microcontrolador para efectuar la conversión de las sentencias NMEA al estándar DCF77.

12) Un conjunto de *leds* para indicar el estado de la tarjeta:

<i>D2</i>	Está encendido cuando está habilitada la salida de 5V.
<i>D4</i>	Está encendido cuando el GPS está energizado.
<i>D5</i>	Enciende y apaga cuando se energiza la tarjeta. Cuando se recibe la información de los satélites muestra una secuencia DCF77.
<i>D6</i>	Está encendido cuando el receptor GPS está captando información de los satélites.

13) Un dispositivo con cuatro *switches* para configurar las siguientes opciones de la tarjeta:

<i>S1-1</i>	OFF= operación normal	ON= modo de ahorro de energía
<i>S1-2</i>	OFF= PPS modulado DCF77	ON=PPS 50% ciclo de trabajo
<i>S1-3</i>	OFF= señal de PPS de bajada	ON= señal de PPS de subida
<i>S1-4</i>	OFF=operación normal	ON=voltaje de entrada bajo apaga salida de 5V

Además, este dispositivo tiene dos modos de operación: receptor-convertor y convertor. En modo receptor-convertor, la tarjeta tiene un receptor GPS interno con el cual genera las sentencias NMEA y una señal PPS. El modo convertor se utiliza cuando la tarjeta no tiene un receptor GPS interno o éste se encuentra deshabilitado. En este caso se debe conectar a la tarjeta una fuente externa GPS, que genere las sentencias NMEA y una señal PPS, a través de una interfaz RS232. La definición del modo de operación se lleva a cabo según la forma que se instale la tarjeta, como receptor convertor o únicamente como convertor.

Instalación de la tarjeta como receptor-convertor

En el modo de instalación como receptor-convertor, se conecta la GPSDCF a una computadora o a una tarjeta SADCXX. Para la conexión de la GPSDCF a la computadora se tiene un conector ISP, mientras que para la conexión de la GPSDCF con la tarjeta SADCXX se tiene un conector que proporciona una salida de pulsos DCF77. Antes de la operación de la tarjeta, se debe conectar al receptor la antena GPS provista, colocándola a cielo abierto o lo más cerca posible de una ventana para una buena recepción. Una vez energizada la tarjeta, el *led D5* comienza a parpadear y toma algunos minutos al receptor rastrear los satélites disponibles, pero tan pronto como los rastrea, el *led D6* se enciende y aproximadamente un minuto después, se empiezan a emular los pulsos DCF77.

Instalación de la tarjeta como conversor

La conexión del receptor GPS externo se hace a través de un conector ISP. Sin embargo, para la recepción adecuada de los datos, el receptor GPS externo se debe programar para emitir la sentencia que contiene los datos mínimos recomendados (RMC: recommended minimum data for gps), el cable de conexión debe elaborarse de acuerdo a las especificaciones RS232 del receptor externo y se deben ajustar apropiadamente el *jumper J3* y el *switch S1-3* de la GPSCDF para recibir la polaridad correcta de la señal PPS. Una vez energizada la tarjeta, su comportamiento es igual que en modo receptor-conversor.

3.3. Desarrollo del software

El *software* para la adquisición y procesamiento de datos, provenientes de la unidad sísmica, se desarrolló en el software para desarrollo de aplicaciones LabVIEW, versión 8.5. Como se mencionó en el capítulo 1, la razón principal de su utilización es porque se tiene una licencia de este paquete. Además, se encontró que se contaba con las funciones necesarias para efectuar las tareas requeridas, con la ventaja de programar en un lenguaje sencillo y de fácil depuración, que podría maximizar el rendimiento de la aplicación.

Así pues, con los conocimientos adquiridos en LabVIEW y principalmente, tomando en cuenta los requerimientos establecidos inicialmente, se decidió programar el *software* de manera que tuviera una estructura de fácil comprensión para el usuario y una apariencia similar a la de los programas que se ejecutan en el sistema operativo Windows (con opciones de menú, cuadros de diálogo, asistentes, etc.).

Dicho lo anterior, se procederá a explicar como se desarrolló el *software*, empezando por el programa principal para después proseguir con las funciones que lo conforman.

3.3.1. Estructura del programa principal

En principio, el programa tiene una ventana principal como la que se muestra en la figura 3.7, dicha ventana es el medio por el que el usuario interactúa para tener acceso a todas las diferentes opciones del programa.

Las partes que constituyen la ventana principal son:

- Una barra de título, en donde aparece el nombre del programa (*Apsis VI.0*), su ícono y los botones para minimizar o cerrar el programa.
- Una barra de menú en donde se muestran las acciones que puede realizar el usuario: *Configuración, Adquisición, Lectura, Procesamiento y Acerca de*. Las acciones de esta barra están organizadas en el orden en que regularmente se opera el programa, es decir, primero se configuran los parámetros previos a la adquisición, después se adquieren los datos y se almacenan en archivos, más tarde se lee el contenido de los archivos y finalmente se procesan los datos.

- Un panel frontal que consta de cuatro áreas:

Canales: es un control en donde se ponen los nombres de los canales que están adquiriendo datos. Al seleccionar cualquiera de los canales, con el mouse, en el área de *Gráfica* se observará su gráfica correspondiente.

Gráfica: es un subpanel en donde se presenta las gráfica del canal seleccionado en el control *Canales*.

Monitor de estado: es una tabla en donde se presenta la información de los canales que están adquiriendo datos.

Ventana de mensajes: es un indicador en donde se muestran mensajes para avisar de algún error y de las acciones efectuadas exitosamente. Esta ventana tiene tres botones. El primero es el botón *Mostrar* y sirve para mostrar en otra ventana el contenido del archivo donde se guardan los mensajes, el segundo es el botón *Borrar* y sirve para borrar el contenido del archivo donde se guardan los mensajes y el último es el botón *Limpiar* y sirve para limpiar el contenido de la *Ventana de mensajes*.

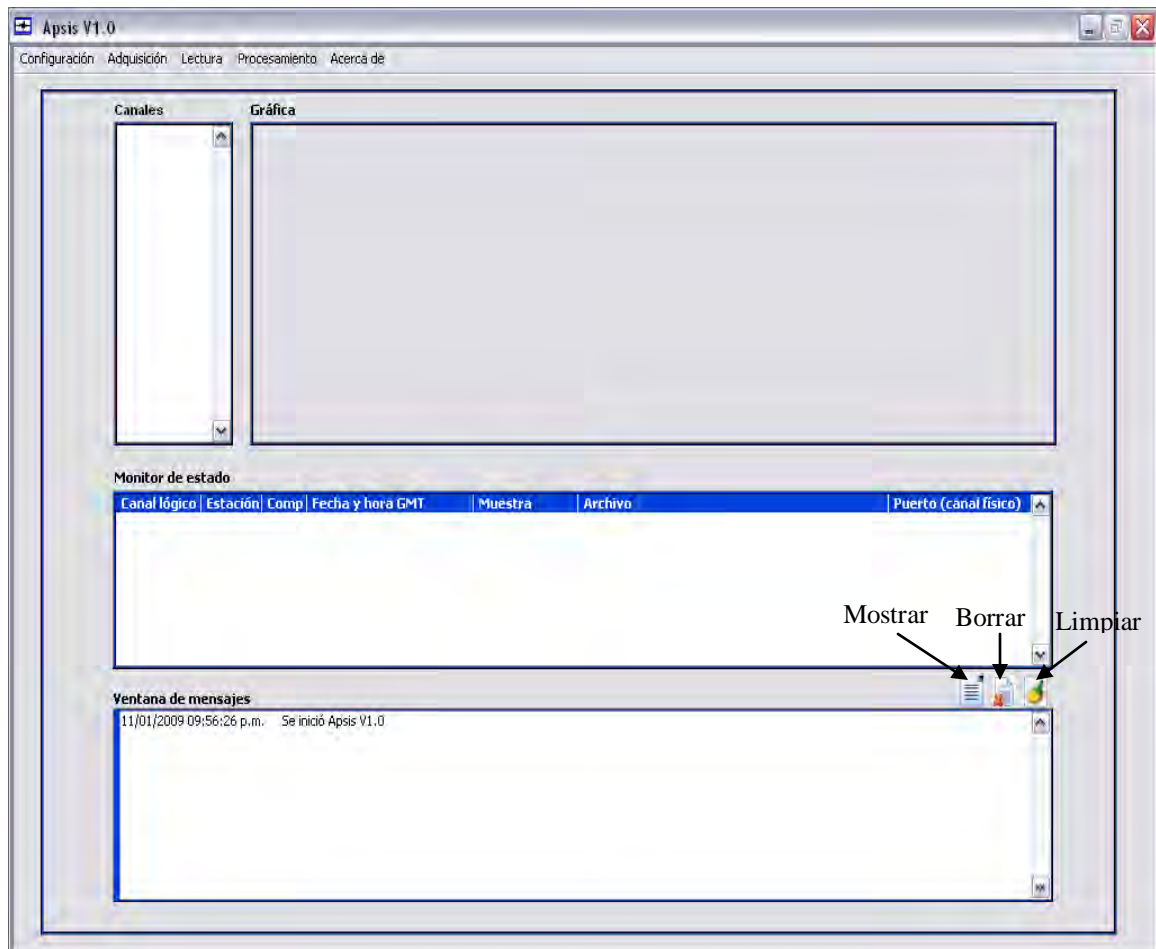


Figura 3.7. Ventana principal del programa.

para el usuario, pero que cumplen con la tarea de grabar y graficar los datos recibidos. Cada uno de estos VIs corresponde a un canal configurado y se distinguen entre ellos por un identificador denominado referencia. Para poder ver la gráfica de algún canal seleccionado, primero se busca su referencia en el arreglo con las referencias de los VIs que han iniciado adquisición. Una vez localizada dicha referencia, se carga el panel frontal del VI asociado y se presenta la gráfica en el subpanel de la ventana principal.

- La instrucción de la limpieza del contenido de la ventana de mensajes y el despliegue o borrado del contenido del archivo donde se almacenan los mensajes. Cuando el usuario selecciona los controles *Limpiar*, *Borrar* o *Mostrar*, se genera un mensaje para avisar a la sección 2 que debe efectuar alguna de estas acciones sobre la ventana de mensajes o su archivo.
- La salida del programa cuando se presiona el botón *Cerrar* de la barra de título y en su caso, la solicitud de confirmación para antes detener la adquisición.

El ciclo *while* de la sección 1 se detiene hasta que el usuario decide salir del programa.

Antes de continuar con la descripción del diagrama de bloques, se dará una breve explicación del concepto cola, debido a que su entendimiento facilitará la comprensión de las secciones 2 y 3.

En principio una cola se puede pensar como una hilera de elementos que esperan un turno para alguna cosa. Dichos elementos se atienden en el orden en que llegan, es decir, el primer elemento en entrar es el primero en salir. En LabVIEW una cola es una herramienta que permite pasar datos entre VIs o entre secciones de un diagrama de bloques. La manera en que esto se hace es, primero se producen datos en los VIs o secciones de diagramas de bloques y se mandan a la cola. En el orden en que vayan llegando los datos a la cola, se van formando para esperar su turno de ser procesados. Así, otro VI o sección del diagrama de bloques, al cual se le denomina consumidor, tiene como tarea quitar uno a uno los datos que estén al frente de la cola y procesarlos. En la figura 3.9 se ilustra el concepto cola.

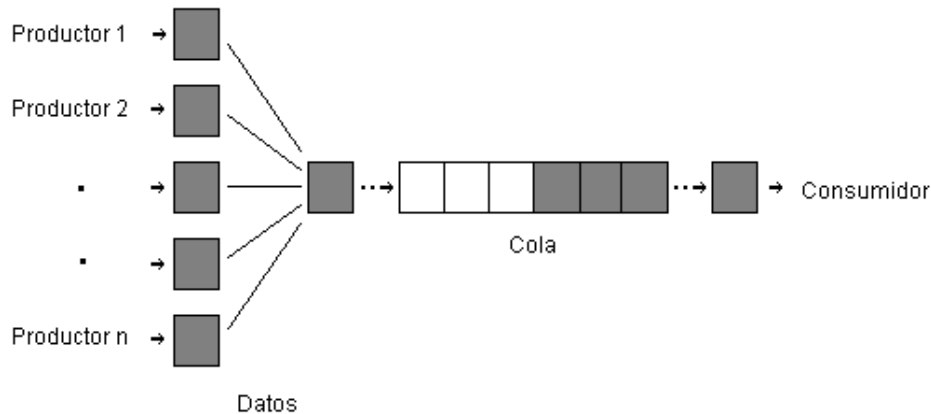


Figura 3.9. Concepto de cola.

Sección 2

La sección 2 del diagrama de bloques (figura 3.10) tiene la función de recibir los mensajes enviados por otros VIs, para ponerlos en la *Ventana de mensajes* del panel frontal, y recibir los mensajes de la sección 1, para realizar la limpieza de la *Ventana de mensajes* o en su caso, el borrado o despliegue del contenido del archivo de mensajes. Los mensajes que son enviados por otros VIs para ser desplegados en la ventana de mensajes contiene alguno de estos avisos: inicio de operación del programa, cierre del programa, falta del archivo de las configuraciones del programa, inicio de la adquisición, fin de la adquisición, puertos de donde se están recibiendo datos, puertos que no se pueden abrir para adquisición y puertos que se hayan desconectado durante la adquisición.

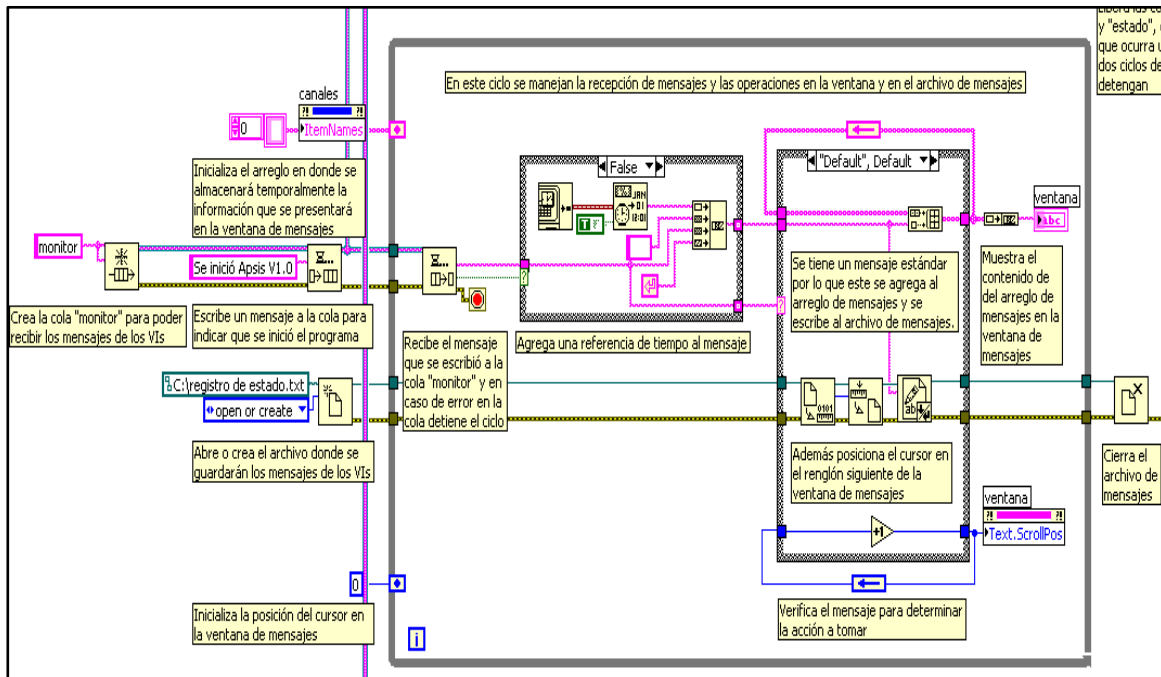


Figura 3.10. Sección 2 del diagrama de bloques de la ventana principal.

La forma en que opera el diagrama de bloques de la sección 2 es la siguiente:

Primero se crea una cola vacía de tipo *string* y se le pone el nombre de *monitor*. Esta cola maneja el mismo tipo de datos que los mensajes generados por otros VIs o por la sección 1 del diagrama de bloques. También se crea o abre el archivo de mensajes donde se almacenarán los mensajes enviados por los otros VIs. Después, dentro de un ciclo *while*, se espera a que se reciba un mensaje que se haya puesto en la cola. Cuando se recibe el mensaje, en una estructura *case* se discrimina si se trata de un mensaje enviado por otros VIs o por la sección 1. Si se trata de un mensaje enviado por otros VIs, se completa agregándole el tiempo de la computadora de acuerdo al horario GMT, para almacenarlo en el archivo de texto y guardarlo temporalmente en un arreglo; a continuación se hace una conversión de tipo al arreglo para mostrar su contenido en la *Ventana de mensajes* como un historial. Si se trata de un mensaje generado por la sección 1, se efectúa la acción solicitada. En caso de que la acción solicitada sea limpiar la *Ventana de mensajes*, se borra el

contenido del arreglo que los almacena temporalmente. En caso de que la acción solicitada sea borrar el contenido del archivo de mensajes, se establece el tamaño del archivo a 0 *bytes*. En caso de que la acción solicitada sea mostrar el contenido del archivo de mensajes, se abre el archivo y se muestra su contenido en otra ventana.

Finalmente, después de que se termina de ejecutar el ciclo *while*, se cierra el archivo de mensajes. El ciclo *while* se detiene cuando la sección 1 provoca un error al destruir la cola monitor.

Sección 3

Cuando se están adquiriendo datos, se tienen corriendo varios VIs de grabado que no son visibles para el usuario, pero que corresponden a cada uno de los canales configurados previamente. Cada VI de grabado genera información para indicar su estado actual y la organiza en un arreglo unidimensional, esto es para enviarla a un solo lugar y que esté disponible para el usuario. La información enviada son algunos parámetros de configuración del canal y datos relacionados con la adquisición y el grabado. Dentro de los parámetros de configuración del canal se tiene el canal lógico, la estación, la componente y el puerto donde está conectada la unidad sísmica. Entre los parámetros relacionados con la adquisición y el grabado están la fecha y hora GMT de los datos, una muestra de éstos y el nombre del archivo en donde se están grabando los datos.

Tomando en cuenta lo anterior, la sección 3 del diagrama de bloques (figura 3.11) tiene como tarea primordial recibir la información enviada por los VIs de grabado, organizarla y presentarla en una tabla (*Monitor de estado* del panel frontal).

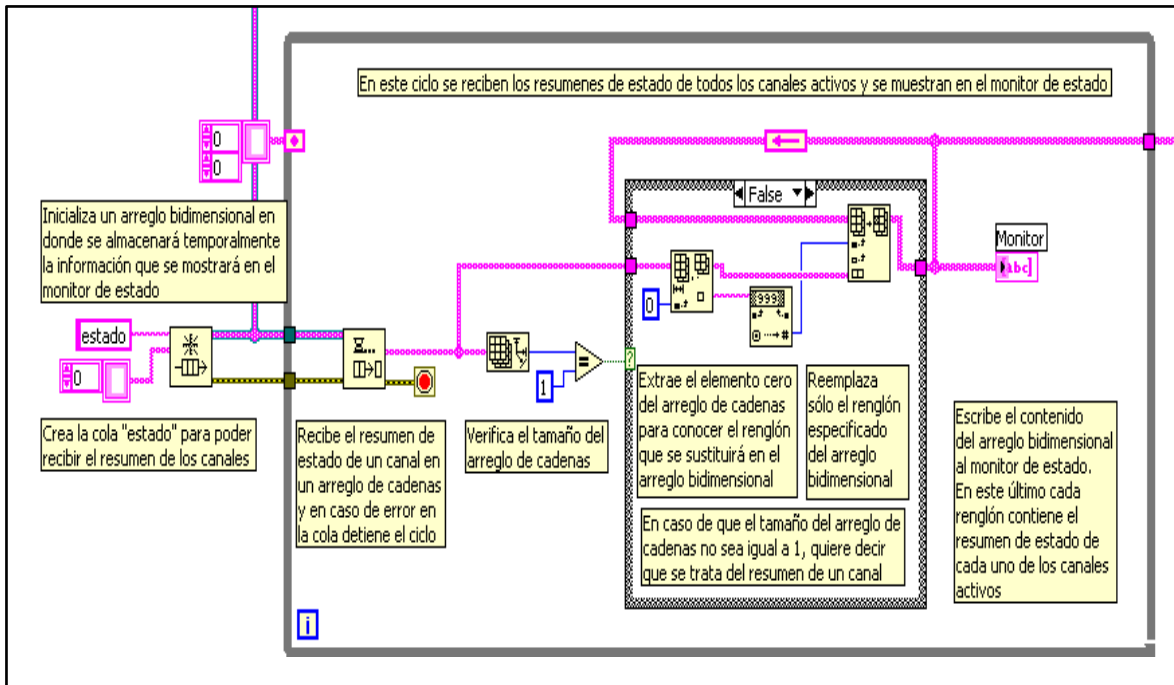


Figura 3.11. Sección 3 del diagrama de bloques de la ventana principal.

La manera en que funciona el diagrama de bloques de la sección 3 es:

Primero se crea una cola llamada estado, que acepta los datos organizados en arreglos de tipo *string*. Esta cola se crea para que durante la adquisición los VIs de grabado manden su información. También se crea un arreglo bidimensional, para que en sus renglones se almacene temporalmente la información que se presentará al usuario. Después, dentro de un ciclo *while*, se espera hasta que haya en la cola información enviada por algún VI de grabado. En cuanto se recibe la información, se verifica que el tamaño del arreglo unidimensional que la contiene sea el correcto, esto con el fin de evitar procesar información errónea. Si no hay error, se procede a depositar la información del arreglo unidimensional en el renglón del arreglo bidimensional que le corresponda, de acuerdo a su número de canal, y en caso de que ya exista información previa en ese renglón, se sobrescribe para actualizarla. En seguida se despliega el contenido del arreglo bidimensional en el *Monitor de estado*.

Finalmente, cuando el usuario elige salir del programa en la sección 1, se destruye la cola estado generando un error que detendrá el ciclo *while* de la sección 3.

Sección 4

La sección 4 (figura 3.12) es la encargada de cerrar la ventana principal. Básicamente lo que se hace en el diagrama de bloques es primero esperar a que concluyan su ejecución las secciones 1, 2 y 3, después, se reinician todos los controles a su valor por *default* y al final se sale de la aplicación.

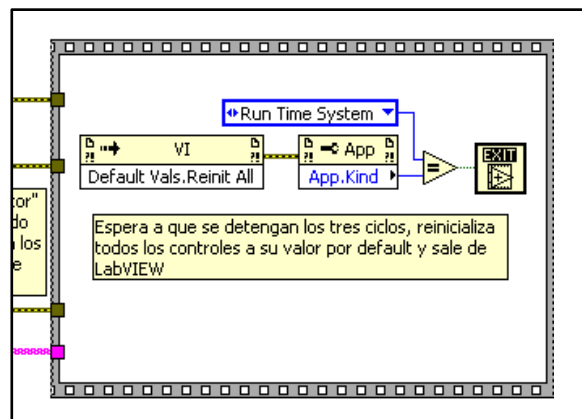


Figura 3.12. Sección 4 del diagrama de bloques de la ventana principal.

Una vez concluida la explicación de programa principal, en las secciones que siguen se procederá a comentar la operación de las opciones disponibles en los menús *Configuración*, *Adquisición*, *Lectura*, *Procesamiento* y *Acerca de*.

3.3.2. Menú configuración

Cuando el usuario abre el programa por primera vez, para realizar una adquisición de datos, lo primero que debe hacer es definir algunos parámetros, como son: en donde se

desea almacenar los datos y de que manera, y la forma en que se comunicará con la unidad sísmica externa. El menú *Configuración* sirve precisamente para especificar dichos parámetros antes de realizar la adquisición de datos. Dentro de las opciones que ofrece el menú están *Directorio base*, *Administrador de canales* y *Salir*, dichas opciones se muestran en la figura 3.13.

Configuración	Adquisición	Lectura	Procesamiento	Acerca de
Directorio base		Ctrl+B		
Administrador de canales		Ctrl+A		
Salir		Ctrl+S		

Figura 3.13. Opciones del menú *Configuración*.

El orden en que el usuario debe preparar al programa para la adquisición de datos es entrando primero a la opción *Directorio base* y luego a la opción *Administrador de canales*, pero si en otra ocasión el usuario ya había preparado el programa y no desea modificar los parámetros establecidos en estas opciones, se puede pasar directamente al menú *Adquisición*. En contraste, la opción *Salir* no es propiamente un opción de configuración, pero se decidió colocarla en este menú porque en otros programas que corren en Windows regularmente la opción para abandonar el programa está justamente en esa ubicación.

Como parte de la descripción del programa es importante conocer las características de las opciones del menú *Configuración*.

Directorio base

La opción *Directorio base* sirve para definir la ubicación que tendrá la carpeta en donde se almacenarán los archivos resultado de la adquisición de datos. Cuando el usuario selecciona la opción *Directorio base*, en el menú *Configuración*, se presenta un cuadro de diálogo como el mostrado en la figura 3.14.



Figura 3.14. Cuadro de diálogo para establecer el directorio base.

El cuadro de diálogo presentado tiene tres campos donde el usuario puede especificar los parámetros para establecer el directorio base:

Nombre del directorio: es un control en donde el usuario escribe el nombre de la carpeta que se va a crear.

Especificar localización: es una casilla de verificación que permite habilitar el control que está debajo para escribir la ruta donde se creará el directorio. Por *default* esta casilla esta deshabilitada.

Ruta del directorio base: es un control para especificar la ruta donde se creará la carpeta. Por *default* este control está deshabilitado y tiene por ruta la de la unidad C, pero si se habilita se puede escribir la ruta en el formato de Windows o utilizar el botón de búsqueda para navegar hacia la ruta deseada.

Una vez que el usuario ha especificado los parámetros para establecer el directorio base, debe presionar el botón *Aceptar*. En ese momento se crea en la ruta señalada la carpeta con el nombre especificado, dentro de esta carpeta se crea otra carpeta con el nombre canales y se cierra el cuadro de diálogo, pero si algún parámetro fue especificado incorrectamente se notifica al usuario la causa del error. Cabe mencionar que si la carpeta especificada ya existía, se conserva su contenido y no se genera ningún error. En caso de que el usuario desee abortar la operación, se tienen el botón *Cancelar* o el botón de *Cerrar*, ubicado en la parte superior del cuadro de diálogo.

Para su descripción, el diagrama de bloques que le da funcionalidad al cuadro de diálogo se puede dividir en dos secciones.

La sección 1 (figura 3.15) efectúa todas las operaciones que se hacen antes de que se presente el cuadro de diálogo al usuario.

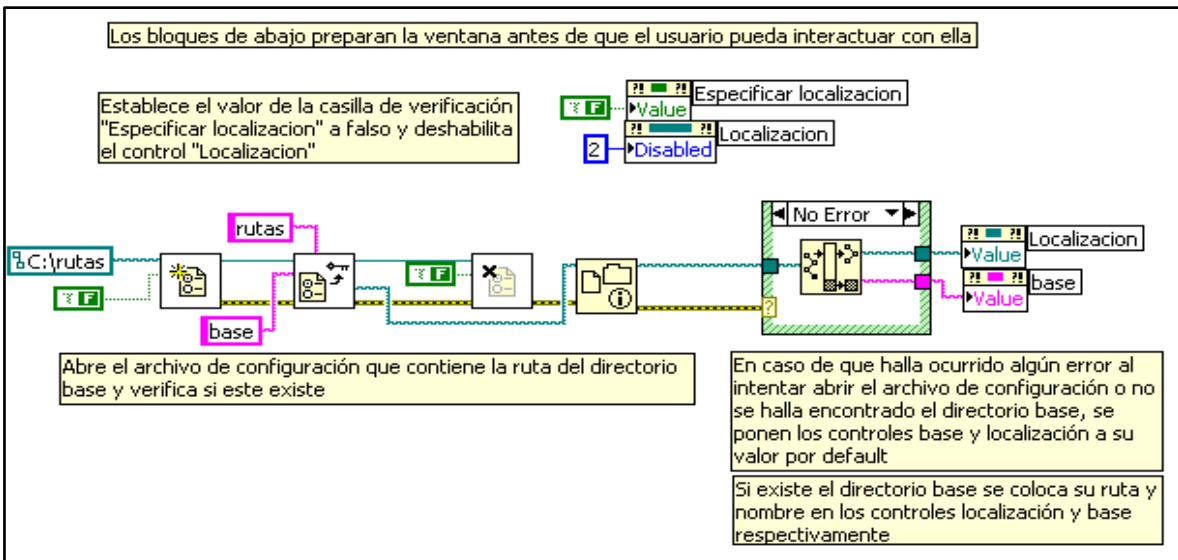


Figura 3.15. Sección 1 del diagrama de bloques para establecer el directorio base.

Administrador de canales

Una unidad sísmica capta las señales provenientes de sus sensores a través de sus tres canales de entrada, a los cuales se les suele llamar canales físicos, por estar implementados físicamente en el *hardware* de dicha unidad. La unidad sísmica convierte las señales recibidas en sus canales físicos a datos digitales para enviarlos a una computadora. En la computadora, por medio de un programa el usuario puede usar estos tres canales físicos para crear canales lógicos, donde cada canal lógico representa una manera de registrar los datos de un canal físico. Así por ejemplo, se podría crear sólo un canal lógico que corresponda al canal físico 1. Otro ejemplo podría ser que el usuario haya creado cuatro canales lógicos en los que los primeros tres canales lógicos correspondan a cada canal físico y el último canal lógico corresponda al canal físico 1, éste último configurado de manera diferente. La utilidad que tiene el uso de los canales lógicos es que permite al usuario realizar distintas pruebas con los datos de cada canal físico.

La opción *Administrador de canales* permite la configuración de canales lógicos para el registro de los datos provenientes de una o varias unidades sísmicas. Asimismo, permite crear una carpeta por canal lógico para que ahí se registren los datos en archivos.

Cuando el usuario selecciona en el menú *Configuración* la opción *Administrador de canales*, se presenta un cuadro de diálogo como el de la figura 3.17. Este cuadro de diálogo tiene cuatro controles: *Canales*, *Agregar*, *Quitar* y *Cerrar*. *Canales* es una lista que muestra los nombres de los canales configurados, *Agregar* es un botón para configurar un canal nuevo, *Quitar* es un botón para borrar uno de los canales configurados y *Cerrar* es un botón para cancelar y salir del cuadro de diálogo.

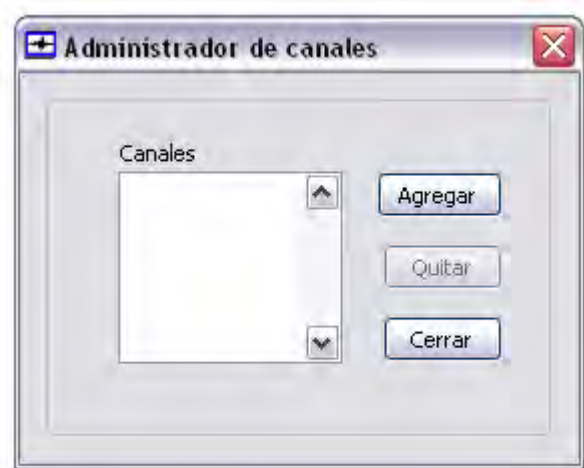


Figura 3.17. Administrador de canales.

Como se observa en la figura 3.17, la lista *Canales* está vacía cuando se utiliza por primera vez el *Administrador de canales*, por lo que las acciones permitidas son agregar un canal o cerrar el cuadro de diálogo. Si se elige agregar un canal, se desplegará un cuadro de diálogo como el de la figura 3.18, en donde se nos indica los elementos a configurar.



Figura 3.18. Configuración del canal.

En el cuadro de diálogo *Configuración del canal*, mostrado en la figura 3.18, se deben especificar:

Número del canal: es el número con el que se identificará el canal por configurar. El programa pone el número 1 si no se ha creado algún canal previamente, de lo contrario pone el número inmediato superior del canal más grande que aparezca en la lista *Canales*. El número puesto por el programa es un número sugerido, por lo que se puede modificar por un número entre 1 y 100, pero si el número del canal ya existe, al presionar el botón *Aceptar* se notificará que no está permitido duplicar el número del canal y se tendrá que modificar.

Código de la estación: es el nombre con el que se va a identificar al punto en donde se va a medir el movimiento. Por *default* este campo está vacío, pero se debe llenar con no más de 8 caracteres. Si no se llena este campo o se excede el número de caracteres permitidos, al presionar el botón *Aceptar*, se notificará del error y se tendrá que reconfigurar el canal.

Componente: es la componente de movimiento que se va a registrar. Las componentes que se pueden seleccionar son Norte (N), Este (E), Vertical (Z), Sur (S) y Oeste (O).

Puerto: es el nombre del puerto de comunicaciones de la computadora a donde está conectada o donde se conectará la unidad sísmica. Los puertos que se pueden seleccionar son desde el COM1 hasta el COM16.

Canal físico: es el canal de la unidad sísmica del que se tomarán datos para registrarlos. Los valores que se pueden seleccionar son 1, 2 ó 3.

Frecuencia de muestreo: es la frecuencia a la que se va a programar la unidad sísmica para que adquiera los datos. Los valores disponibles son 50, 100 y 200 muestras por segundo, pero si en la configuración de otro canal ya se había establecido una frecuencia para un puerto determinado, esta opción se deshabilita para evitar que la unidad sísmica conectada a ese puerto se programe a frecuencias distintas y ocurra un error.

Modo de grabado: es la manera en que se registrarán los datos adquiridos. Los modos disponibles son continuo y *ringbuffer*. En modo continuo se registran los datos en archivos de cierta duración en minutos, los cuales se crean uno tras otro. En modo *ringbuffer*, al terminar la configuración del canal se crean varios archivos numerados y vacíos, cuya cantidad depende del número de días que se quiere registrar y de la duración de cada archivo en minutos; durante la adquisición los datos se comienzan a registrar en el primer archivo vacío, luego se registra en el segundo archivo vacío y así sucesivamente hasta terminar con el último, momento en el cual, si se da el caso, se comenzará a registrar otra vez en el primer archivo, sobrescribiendo sobre la información anterior.

Tamaño en minutos: es la duración en minutos que tendrá cada archivo donde se registrarán los datos. La duración que se puede seleccionar está en el rango de 1 a 60 minutos.

Tamaño en días (esta opción no aparece en la figura porque sólo es visible en el modo *ringbuffer*): es el número de días para los que se creará el *ringbuffer*. El número de días que se puede establecer es de 1 a 30.

Tamaño de cada archivo en bytes: es un indicador donde se muestra el tamaño que tendrá cada archivo en *bytes*, de acuerdo al tamaño en minutos especificado.

Total de archivos (esta opción no aparece en la figura porque sólo es visible en el modo *ringbuffer*): es un indicador donde se muestra el número de archivos vacíos que se crearán de acuerdo al tamaño en días especificado. El número máximo de archivos que se pueden crear son 9999, por lo que si se excede el número y se presiona *Aceptar* se notificará del error.

Una vez establecida la configuración del canal, se debe presionar el botón *Aceptar*. En ese momento si ocurre algún error, el programa avisa la causa y regresa al cuadro de diálogo para que se modifique el parámetro que lo provoca, sino, dentro de la carpeta canales se crea una carpeta con el nombre del canal. Dentro de ésta se crea un archivo para guardar la configuración del canal y se crea una carpeta llamada registro, en donde de ser el

caso, se crean los archivos que conformarán el *ringbuffer*. Después, el programa cierra el cuadro de diálogo *Configuración del canal*, avisa que se creó el canal exitosamente y regresa al *Administrador de canales* donde se actualiza la lista *Canales*. En el *Administrador de canales* se puede continuar agregando canales hasta tener los que se requieran.

En caso de que se necesite eliminar alguno de los canales existentes, primero se debe seleccionar el canal de la lista *Canales* y después presionar el botón *Quitar*. En seguida se advertirá en un cuadro de diálogo que se borrará el canal y todos los archivos que estén en su carpeta. Si se acepta se ejecutará la acción mencionada, se avisará que se quitó el canal exitosamente y se actualizará la lista *Canales*, de lo contrario se cancelará la acción y se regresará al *Administrador de canales*.

Para que se pueda llevar a cabo las opciones descritas en el *Administrador de canales*, es necesario realizar la programación correspondiente.

En principio, cuando se selecciona *Administrador de canales* del menú *Configuración*, internamente se manda a llamar a un subVI que se encarga de verificar que existen las condiciones adecuadas para abrir el cuadro de diálogo del *Administrador de canales*. El diagrama de bloques de este subVI se presenta en la figura 3.19. En este subVI, la primera condición que se verifica es la existencia del archivo de configuración rutas. En caso de que no exista el archivo, quiere decir que todavía no se ha establecido el directorio base, por lo que no se permitirá el acceso al *Administrador de canales* y se desplegará un mensaje avisando que se debe establecer primero. Si se encuentra el archivo, se lee de éste la ruta de la carpeta de canales y se verifica que realmente exista la carpeta canales. Si existe la carpeta, se llama a otro subVI para que abra el cuadro de diálogo del *Administrador de canales*, sino, se avisa que no existe dicha carpeta y que la solución a este error es crear de nuevo el directorio base.

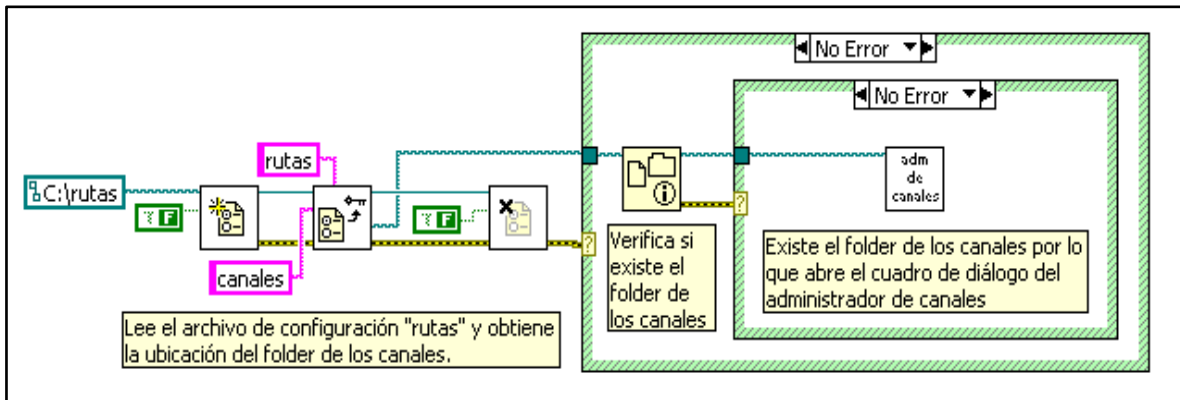


Figura 3.19. SubVI que verifica las condiciones antes de abrir el Administrador de canales.

El subVI que abre el cuadro de diálogo del *Administrador de canales*, es también el encargado de manejar todas las acciones que en éste ocurren. En este subVI se tiene un ciclo *while*, el cual contiene dos secciones de código.

La sección 1 contiene el código que se ejecuta antes de cada iteración (ver figura 3.20). En esta sección se realiza la actualización de la lista *Canales*, el manejo de un cuadro de diálogo para avisar el estado de las tareas realizadas y el almacenamiento de algunos parámetros de los canales activos en un arreglo. Para la actualización de la lista *Canales*, se obtienen los nombres de los canales existentes a partir de los nombres de las carpetas contenidas en la carpeta canales, se ordenan los nombres de los canales de manera ascendente y se despliegan en la lista *Canales*. Para el manejo del cuadro de diálogo se recibe uno de cinco estados generados por las opciones agregar y quitar de la estructura de eventos. El estado 0 quiere decir que no se despliegue el cuadro de diálogo, el estado 1 indica que ocurrió un error al intentar crear el archivo de configuración o el *ringbuffer*, el estado 2 indica que se creó el canal exitosamente, el estado 3 indica que ocurrió un error al intentar quitar el canal y el estado 4 indica que se quitó el canal exitosamente. Para el almacenamiento de los parámetros de los canales activos, se leen los datos del puerto y la frecuencia de muestreo de los archivos de configuración de los canales existentes y esos datos se colocan en un arreglo.

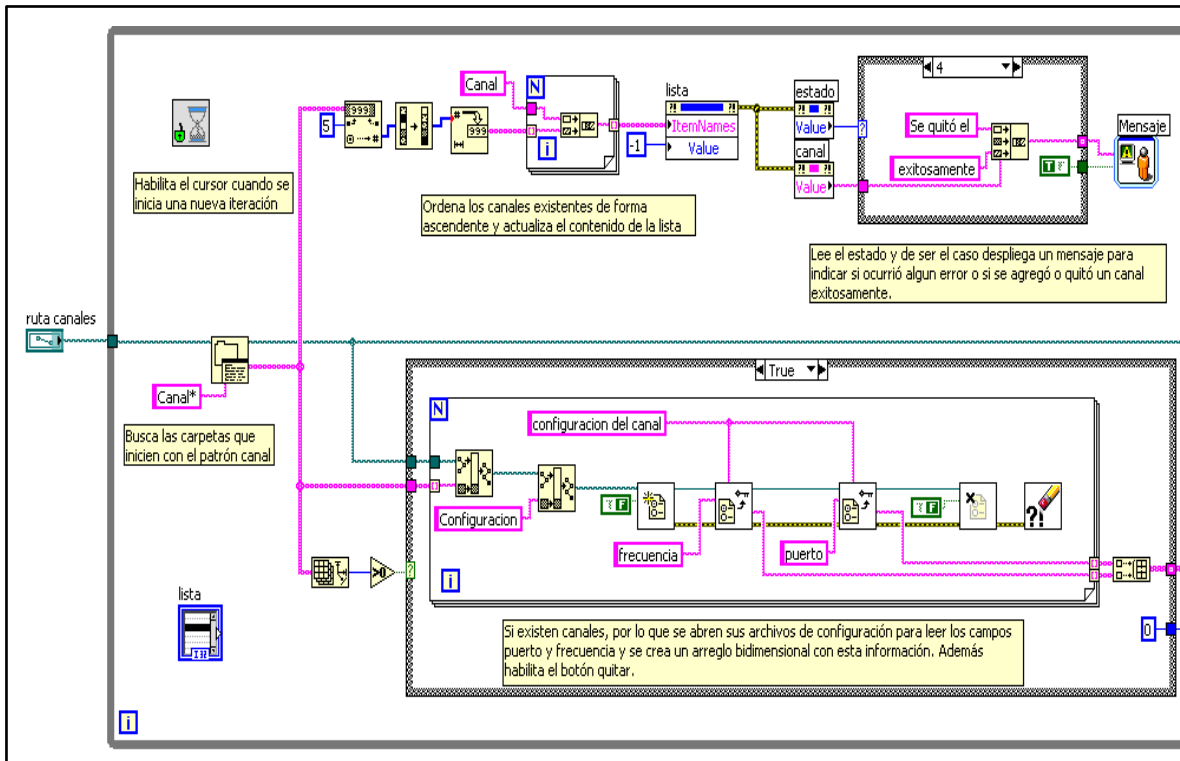


Figura 3.20. Sección 1 del diagrama de bloques del Administrador de canales.

La sección 2 del programa contiene la estructura de eventos que pone en espera al ciclo *while* hasta que el usuario realiza alguna acción en el *Administrador de canales* (ver figura 3.20). Los eventos que se manejan en esta estructura son tres:

- *Se presionó el botón Agregar.* En este caso se calcula el número que tendrá el canal que se agregará y se pasa este valor, junto con la ruta de los canales y el arreglo de los parámetros de los canales activos, a un subVI, para que éste último abra el

cuadro de diálogo donde se configurará el canal. Al término de la ejecución de este subVI se genera un valor para indicar el estado de la operación.

- *Se presionó el botón Quitar.* En este caso primero se verifica que se haya seleccionado algún canal de la lista *Canales*. Si no se seleccionó algún canal, se despliega un cuadro de diálogo para avisar al usuario que debe seleccionar uno. Si se seleccionó algún canal se abre un cuadro de diálogo para preguntar si realmente se desea borrar el canal y todo su contenido. En caso de que se acepte, se utiliza una función para borrar la carpeta del canal y todo su contenido, y al terminar se genera un estado para indicar si la operación tuvo éxito. En caso de que se cancele la operación se genera un estado para indicar que la operación no se realizó.
- *Se presionó el botón Cerrar.* En este caso se detiene la ejecución del ciclo *while* para que se cierre el cuadro de diálogo.

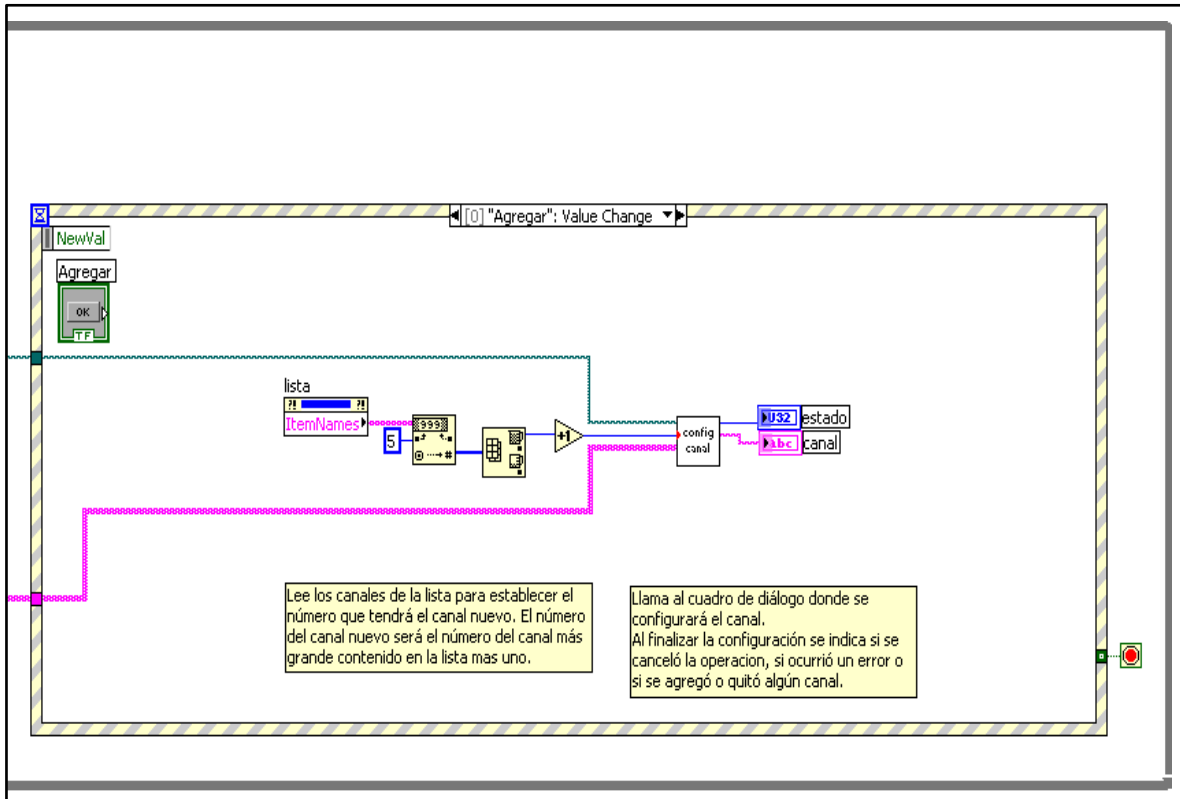


Figura 3.21. Sección 2 del diagrama de bloques del Administrador de canales.

El subVI que abre el cuadro de diálogo *Configuración del canal*, también controla todas las acciones que ocurren en éste. Para una mejor comprensión, el diagrama de dicho subVI se puede dividir en dos secciones.

La sección 1 se encarga de establecer algunos valores en los controles e indicadores antes de que el usuario pueda interactuar con el cuadro de diálogo. Como se observa en la figura 3.22, esta sección se divide en tres bloques.

En el bloque 1 se toman los valores de los controles *Tamaño en minutos*, *Tamaño en días* y *Frecuencia de muestreo* para calcular el valor de los indicadores *Tamaño de cada archivo en bytes* y *Total de archivos*. El subVI que realiza estos cálculos utiliza las siguientes ecuaciones:

$$\text{Tamaño en bytes} = 240 \times \text{Tamaño en minutos} \times \text{Frecuencia de muestreo} + 632 \quad (3.1)$$

$$\text{Total de archivos} = (\text{Tamaño en días} \times 24 \text{ horas} \times 60 \text{ minutos}) / \text{Tamaño en minutos} \quad (3.2)$$

En la ecuación 3.1 el número 240 proviene del hecho de multiplicar 4 *bytes* que ocupa cada muestra por 60 segundos y el número 632 es la longitud en *bytes* del encabezado del formato SAC binario.

En el bloque 2 se verifica el valor del control *Modo de grabado* y en caso de que éste sea *ringbuffer*, se hace visible el control *Tamaño en días* y el indicador *Total de archivos*.

En el bloque 3 se toma el arreglo que contiene los parámetros de los canales activos y el valor del control *Puerto* para decidir si habilitar o no el control *Frecuencia de muestreo*. Con esto se asegura que el usuario sólo pueda establecer una sola frecuencia de muestreo por unidad sísmica.

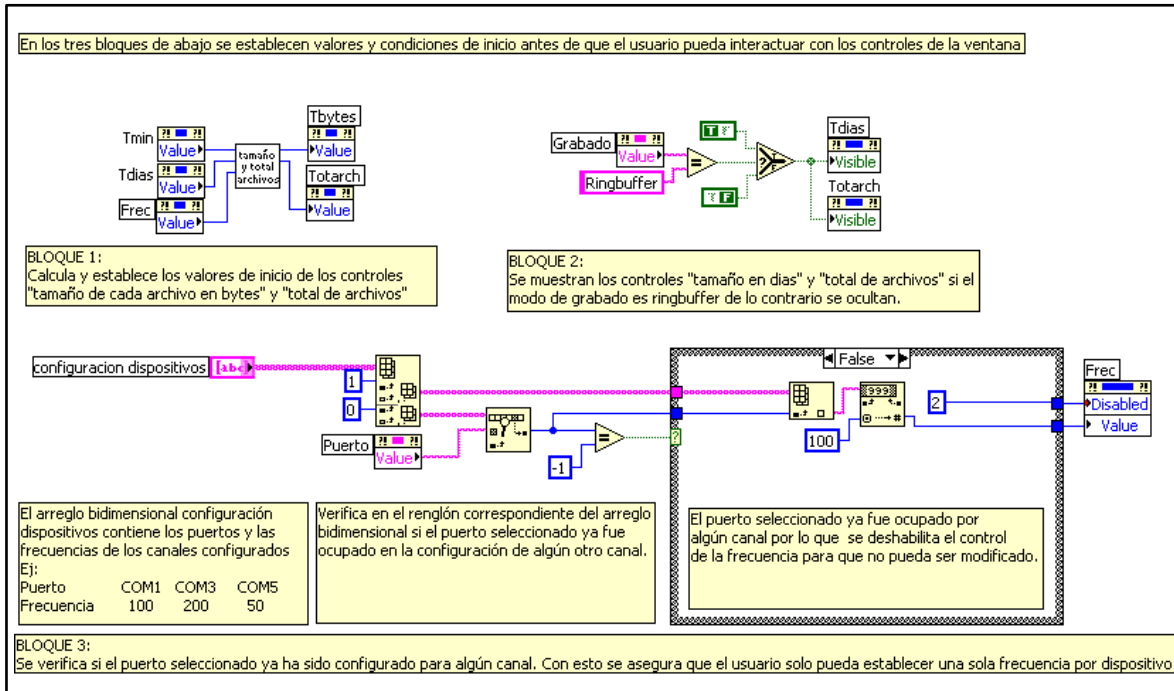


Figura 3.22. Sección 1 del diagrama de bloques para configurar el canal.

La sección 2 maneja mediante un ciclo *while* y una estructura de eventos, las acciones que se realizan cuando el usuario interactúa con el cuadro de diálogo *Configuración del canal*. Los cinco eventos que se manejan tienen como funciones principales las siguientes:

- *Se presionó el botón Aceptar.* En este evento, primero se verifica si ocurrió alguna condición de error generada por algún valor establecido en el cuadro de diálogo (ver figura 3.23).

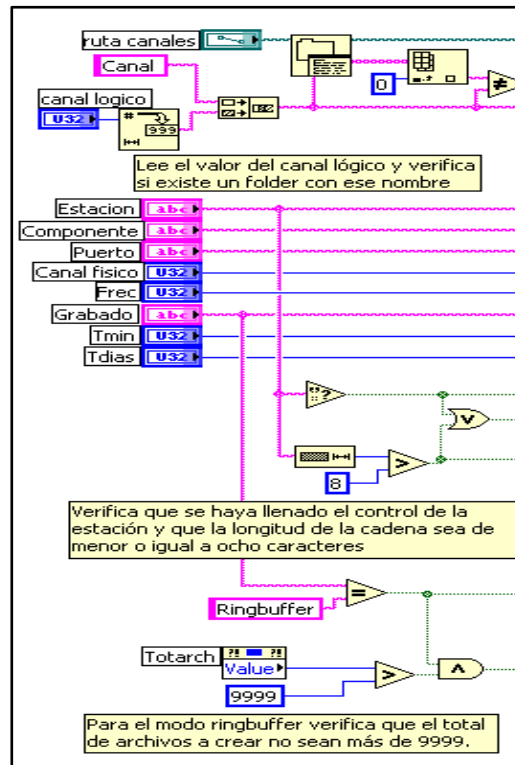


Figura 3.23. Verificación de errores antes de crear un canal.

Si ocurrió algún error se utilizan estructuras *case* anidadas para identificar la causa del error y se habilita un cuadro de diálogo para avisar al usuario. Dependiendo del error, los mensajes que se despliegan en el cuadro de diálogo son: se especificó un número de canal ya existente, no se especificó el código de la estación, se especificó el código de la estación usando más de ocho caracteres y no se pueden crear más de 9999 archivos para un *ringbuffer*. En todos estos casos de error no se detiene el ciclo *while* y por tanto no se cierra el cuadro de diálogo *Configuración del canal*. Por otra parte, si no ocurre alguna condición de error, se crea primero la carpeta del canal, en donde se crea la carpeta de registro y un archivo llamado configuración (ver figura 3.24). En la carpeta de registro se crean varios archivos para el modo *ringbuffer* o se deja vacía para el modo continuo. En el archivo configuración se almacenan los valores de los siguientes parámetros: nombre del canal, código de la estación, componente, puerto, canal físico, frecuencia, modo de grabado, tamaño en minutos y tamaño en días. Al terminar la creación de los archivos y carpetas mencionadas, se detiene el ciclo *while* para que se cierre el cuadro de diálogo.

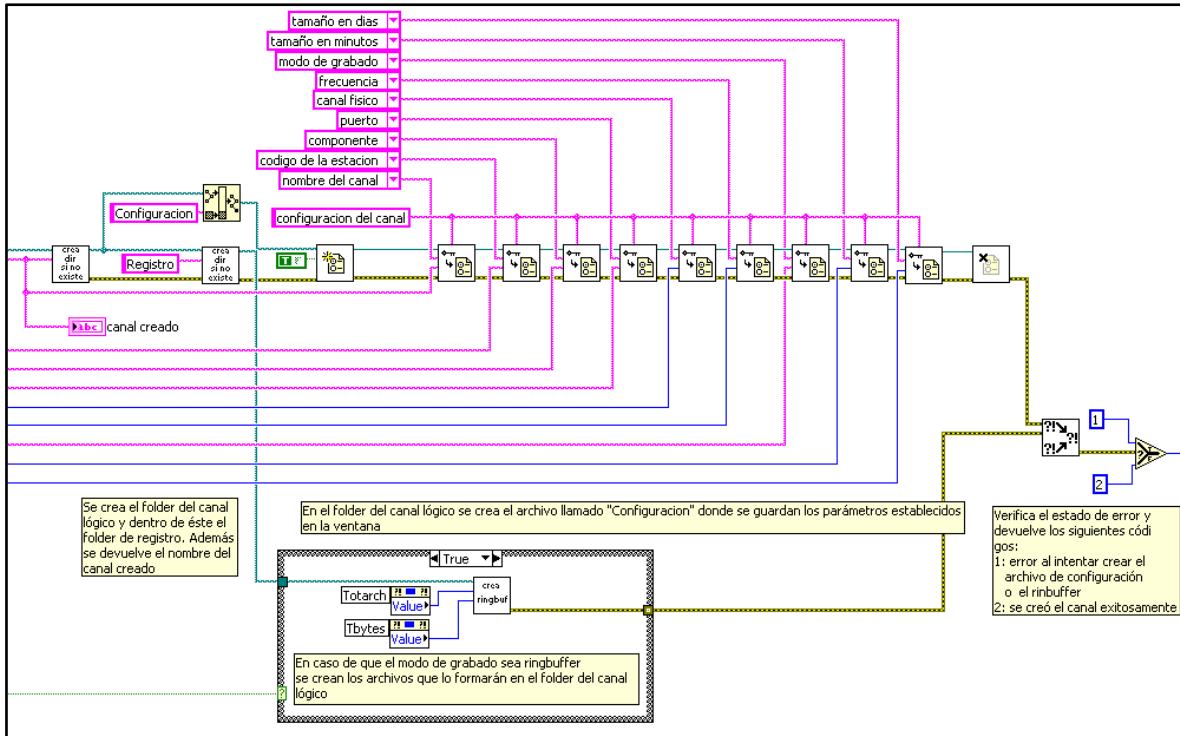


Figura 3.24. Creación de carpetas y archivos de un canal.

- Se presionó el botón Cancelar o el botón Cerrar. En este evento se detiene el ciclo *while* para cerrar el cuadro de diálogo.
- Se modificó el valor de los controles *Tamaño en minutos*, *Tamaño en días* o *Frecuencia de muestreo*. En este evento se toma el valor de estos controles para aplicarlos en las ecuaciones 3.1 y 3.2, y mostrarlos en los indicadores *Tamaño de cada archivo en bytes* y *Total de archivos*. El código para este evento es idéntico al del bloque 1 de la figura 3.22.
- Se modificó el valor del control *Modo de grabado*. En este evento, si el valor del control es *ringbuffer*, se hacen visibles los indicadores *Tamaño en días* y *Total de archivos*, de lo contrario se ocultan. El código para este evento es idéntico al del bloque 2 de la figura 3.22.
- Se modificó el valor del control *Puerto*. En este evento se verifica si el puerto seleccionado ya ha sido configurado para otro canal. Para ello se busca el puerto seleccionado en el arreglo que contiene los puertos y las frecuencias de muestreo de los canales configurados. Si se encuentra el puerto seleccionado se deshabilita el control frecuencia de muestreo para asegurar que se mantenga solo una frecuencia para ese puerto, de lo contrario se habilita el control frecuencia. Luego se toma el valor de los controles *Tamaño en minutos*, *Tamaño en días* y *Frecuencia de muestreo*, para aplicarlos en las ecuaciones 3.1 y 3.2, y se muestra el resultado en los indicadores *Tamaño de cada archivo en bytes* y *Total de archivos*. El código para este evento incluye el bloque 1 y 3 de la figura 3.22.

Como ya se mencionó, cuando se escoge el modo *ringbuffer* y se presiona el botón *Aceptar* en el cuadro de diálogo *Configuración del canal*, se crean varios archivos vacíos en la carpeta de registro. El diagrama de bloques del subVI que realiza esta tarea se muestra en la figura 3.25. En esta figura se puede observar que los parámetros que se necesitan para la creación de los archivos son: la ruta de la carpeta de registro, el número de archivos a crear y el tamaño en *bytes* que tendrá cada archivo. Una vez proporcionados estos parámetros, se crea un archivo binario llamado *RB_Ctrl*, para almacenar el número de archivo a ser grabado y se crean los archivos del *ringbuffer* de forma recursiva, utilizando para ello un ciclo *for*. Durante toda la operación de este subVI se muestra al usuario un cuadro de diálogo con una barra de progreso, la cual se controla con las funciones *launch* (crear), *update* (actualizar) y *close* (cerrar).

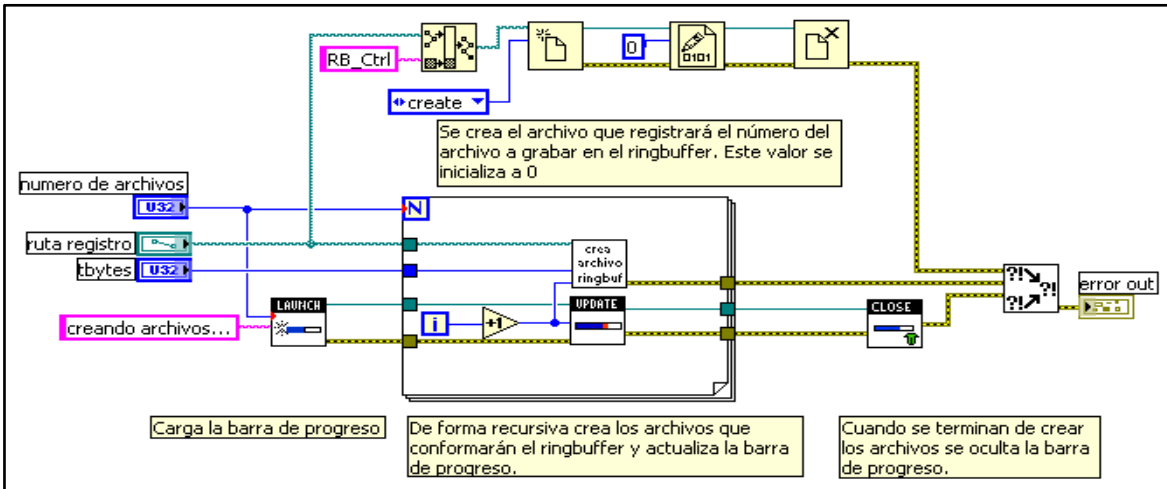


Figura 3.25. SubVI para la creación de los archivos del ringbuffer.

En la figura 3.26 se muestra el subVI que se ejecuta dentro del ciclo *for* de la figura 3.25. Este subVI tiene la función de crear un archivo y sus parámetros de entrada son: la ruta de la carpeta de registro, el índice del ciclo *for* y el tamaño del archivo. La manera en que trabaja este subVI es la siguiente: se utiliza el índice del ciclo *for* para formar un nombre corto con el formato *Rxxxx.sac*, donde *xxxx* es el número del archivo, después con ese nombre corto y la ruta de la carpeta de registro, se crea un archivo con el tamaño en *bytes* solicitado.

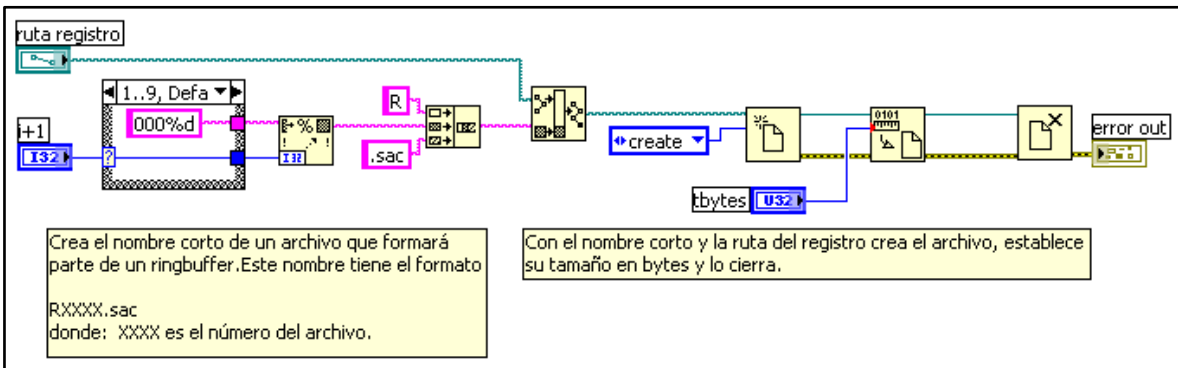


Figura 3.26. SubVI para crear un archivo del ringbuffer.

Salir

La opción *Salir* tiene como función principal cerrar la ventana principal del programa. El diagrama de bloques del subVI que se encarga de llevar a cabo esta función se muestra en la figura 3.27. En este VI primero se verifica el estado de operación del programa, es decir, si se está o no adquiriendo datos.

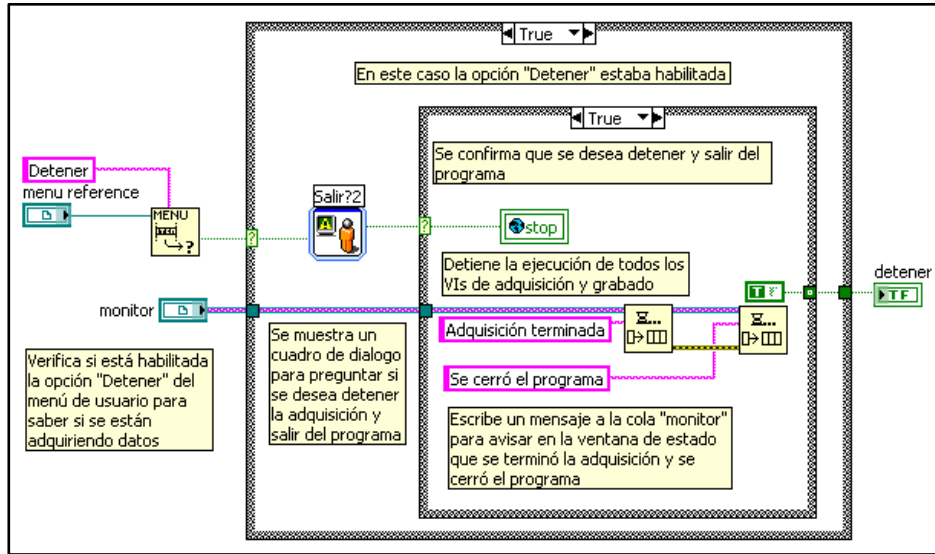


Figura 3.27. SubVI para salir del programa.

En caso de que se esté adquiriendo datos, se muestra un cuadro de diálogo para advertir que primero se detendrá la adquisición y después se abandonará el programa. Si aún así se decide salir del programa, se detienen todos los VIs de adquisición que estén corriendo y éstos a su vez detienen la ejecución de los VIs de grabado que estén recibiendo datos. Después se escriben mensajes en la ventana de estado para avisar que se terminó la adquisición y se cerró el programa. Al final se devuelve una constante verdadera para detener el ciclo de la sección 1 del diagrama de bloques de la ventana principal. Pero si en el cuadro de diálogo se cancela la operación, se mantendrán los VIs de adquisición y grabado en funcionamiento. Por otro lado, si no se están adquiriendo datos, únicamente se escribe un mensaje en la ventana de estado para avisar que se cerró el programa y se devuelve una constante verdadera para detener el ciclo de la sección 1 del diagrama de bloques de la ventana principal.

3.3.3. Menú adquisición

Una vez que el usuario ha establecido el directorio base y ha creado los canales requeridos en el *Administrador de canales*, el siguiente paso en la ejecución del programa es iniciar la adquisición y el registro de datos. Para realizar dicha tarea, el programa cuenta con dos opciones en el menú *Adquisición* (ver figura 3.28). La primera opción es el *Modo registro*, en la cual se adquieren y se registran los datos; mientras que la segunda opción es el *Modo prueba*, en la cual sólo se adquieren datos sin registrarlos. Estas opciones permanecen habilitadas si todavía no se ha seleccionado alguna ellas, pero en cuanto esto se hace se deshabilitan las dos y se habilita la opción *Detener*. Por su parte, esta última opción

tiene como función detener la adquisición de datos, por lo que en cuanto se selecciona detiene la ejecución de la opción seleccionada y vuelve a habilitar las primeras dos opciones ya comentadas.

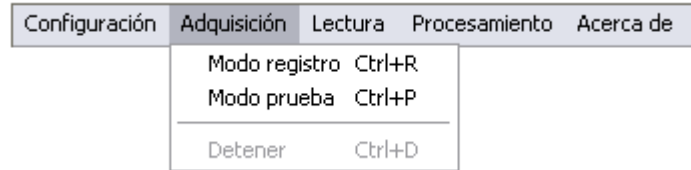


Figura 3.28. Opciones del menú Adquisición.

Para la comprensión de cada una de estas opciones, se describirá en los siguientes dos apartados sus diagramas de bloques y las ideas utilizadas para su creación.

Modo prueba y modo registro

La opción *Modo prueba* se estableció debido a que en algunas ocasiones es conveniente realizar una evaluación del desempeño de la adquisición de datos sin registrar todavía los datos. Por otro lado, la opción *Modo registro* es la que propiamente guarda los datos recibidos en archivos. La forma en que funcionan ambas opciones es la siguiente:

Al seleccionar la opción *Modo prueba* o la opción *Modo registro* del menú *Adquisición*, el programa verifica que se haya establecido el directorio base y que se haya configurado al menos un canal. En caso de que falte alguna de estas condiciones, no se inicia la adquisición de datos y se informa al usuario la causa del error por medio de un cuadro de diálogo. Si no existe algún error, aparecen los nombres de todos los canales que están recibiendo datos en la lista *Canales*. Enseguida en la *Ventana de mensajes* se muestra que se inició la adquisición y los nombres de los puertos de donde se están recibiendo datos. También se muestra en el *Monitor de estado* un resumen de los parámetros estáticos y dinámicos de los canales que están recibiendo datos. Los parámetros estáticos son algunos valores que se establecieron en la configuración de cada canal, como canal lógico, estación, componente, puerto y canal físico. Los parámetros dinámicos son valores que se actualizan en función de los datos recibidos y la forma en que estos se registran. Los parámetros dinámicos son: la fecha y la hora GMT de los datos recibidos, la primer muestra de las n muestras recibidas en un segundo y el nombre del archivo en donde actualmente se están registrando los datos. En la opción *Modo prueba*, en lugar del nombre del archivo se muestra la leyenda “Modo prueba” indicando que únicamente se está observando el comportamiento del sistema, en cuanto a la adquisición de las señales.

En cualquiera de los dos modos, si se escoge un canal de la lista *Canales* y éste se encuentra recibiendo datos, se muestra la gráfica del canal seleccionado en el subpanel *Gráfica*. Esta gráfica retiene los datos históricos adquiridos, según lo permita el ancho de la pantalla de la gráfica, y cada segundo agrega los datos nuevos delante de los ya existentes. El eje y de la gráfica representa la amplitud de la señal del canal en *cuentas* y se puede ajustar con los controles *Autoescala* y ó *Escala* y. El control *Autoescala* y ajusta la escala del eje y, de manera que se abarquen los valores máximo y mínimo de la señal del canal,

mientras que el control *Escala* y ajusta simétricamente la escala del eje y en potencias de dos, permitiendo valores desde $\pm 2^8$ (± 256) hasta $\pm 2^{24}$ (± 16777216) *cuentas*. El eje *x* de la gráfica representa el número de muestras adquiridas y se puede modificar con el control *Escala x*, permitiendo abarcar desde 1000 hasta 10000 muestras. En la gráfica también se muestra el nombre del canal seleccionado y se indica en un *led* cuando el reloj de la unidad sísmica se actualiza utilizando el receptor GPS.

En la figura 3.29 se muestra la apariencia del panel frontal cuando se están adquiriendo datos.

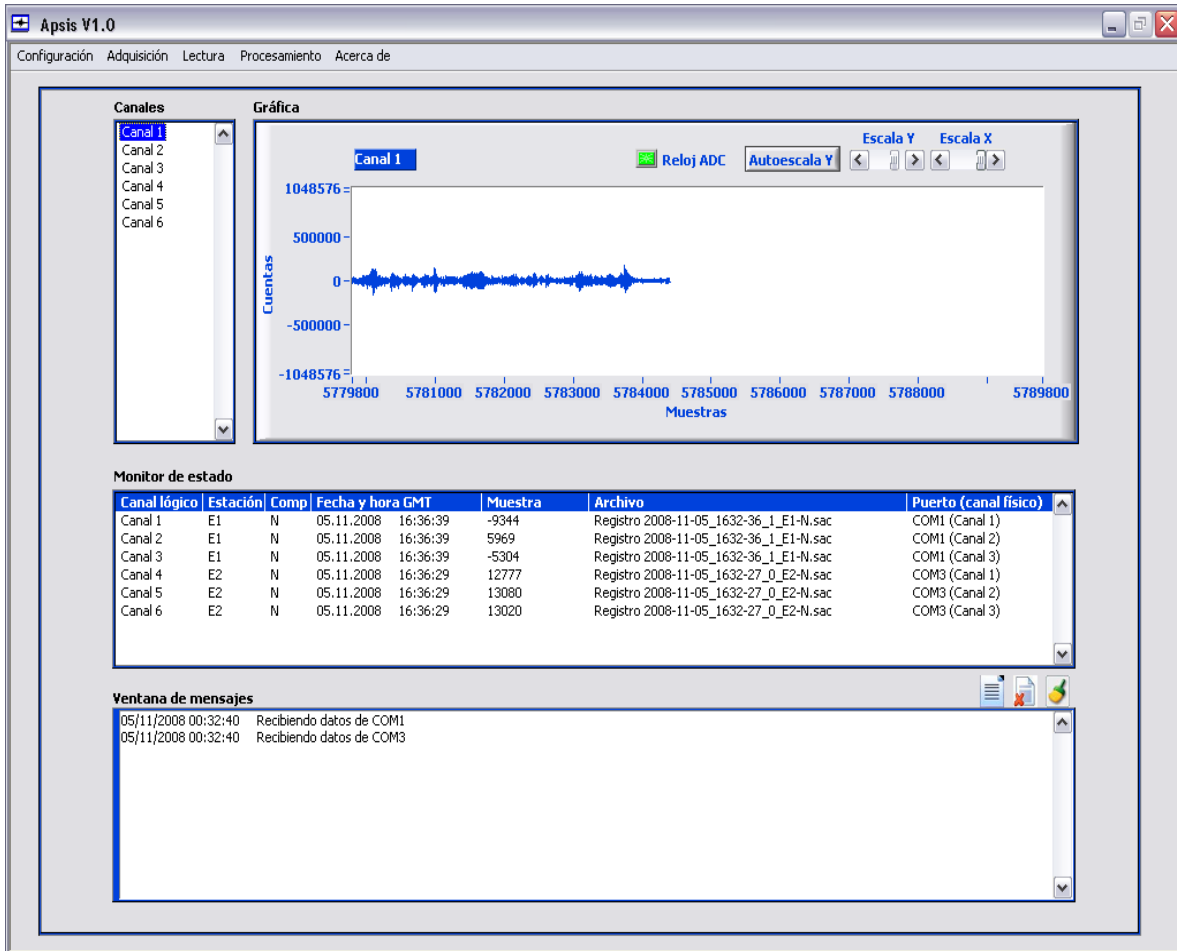


Figura 3.29. Ventana principal durante la adquisición de datos.

Antes de iniciar la explicación del diagrama de bloques de estas opciones, se dará una explicación general de la idea que se utilizó para el desarrollo de la adquisición y el grabado de datos.

En primera instancia, las herramientas más importantes de LabVIEW que se utilizaron son el VI server, la propiedad de *reentrancy* y los notficadores. El VI server es un conjunto de funciones que permite cargar dinámicamente, editar y correr VIs en una computadora o remotamente a través de en una red. La propiedad de *reentrancy* permite correr múltiples llamadas de un VI simultáneamente. De aquí que, si un VI se establece

como *reentrant*, cada vez que se llame a este VI, se creará una copia del VI original que manejará sus datos de forma independiente. Un notificador es una función que se utiliza para suspender la ejecución de un diagrama de bloques o de un VI hasta que se reciban datos de otra sección del diagrama de bloques o de otro VI corriendo en la misma aplicación. Un uso que se le puede dar a un notificador es la de un demultiplexor, en donde se tiene un VI que genera datos y los pone disponibles a varios VIs que los estén esperando.

Como ya se describió, antes de iniciar la adquisición y el grabado de datos, se configuran los canales que se necesitan. Cada uno de estos canales representa una forma distinta o similar de grabar los datos, por lo que durante el registro de datos se necesitan tantos VIs de grabado como canales configurados se tengan. Por otra parte, la configuración de cada canal contiene, entre otra cosas, el puerto donde que está conectada la unidad sísmica y la frecuencia de muestro que se programará en dicha unidad, por lo que se necesitan tantos VIs de adquisición como unidades sísmicas se hayan conectado, o dicho de otro modo, se necesitan tantos VIs de adquisición como diferentes puertos se hayan especificado en las configuraciones de los canales. Así, por ejemplo, si se hubieran configurado los canales 1 y 2 para recibir datos del puerto COM1 a 100 sps y los canales 3, 4 y 5 para recibir datos del puerto COM2 a 200 sps, se necesitarían dos VIs de adquisición (uno por cada puerto) y cinco VIs de grabado (uno por cada canal) (ver figura 3.30). Esto implica que se debe tener una manera de crear dos copias del VI de adquisición y cinco copias del VI de grabado, y es justamente aquí en donde se utilizan dos de las herramientas de LabVIEW mencionadas. El VI server permite abrir los VIs de adquisición y grabado, pero combinada esta herramienta con la propiedad de *reentrancy* se pueden generar dos copias del VI de adquisición y cinco copias del VI de grabado, las cuales podrán manejar sus datos de forma independiente. Una vez abiertas estas copias, se deben establecer sus parámetros de inicio, los cuales para las copias de los VIs de adquisición son el puerto y la frecuencia, y para las copias de los VIs de grabado es la configuración de cada canal. Después se deben correr primero las copias de los VIs de grabado y a continuación las copias de los VIs de adquisición, de manera que no sean visibles sus paneles frontales. El establecimiento de los parámetros de inicio de los VIs y su ejecución también se hace utilizando el VI server.

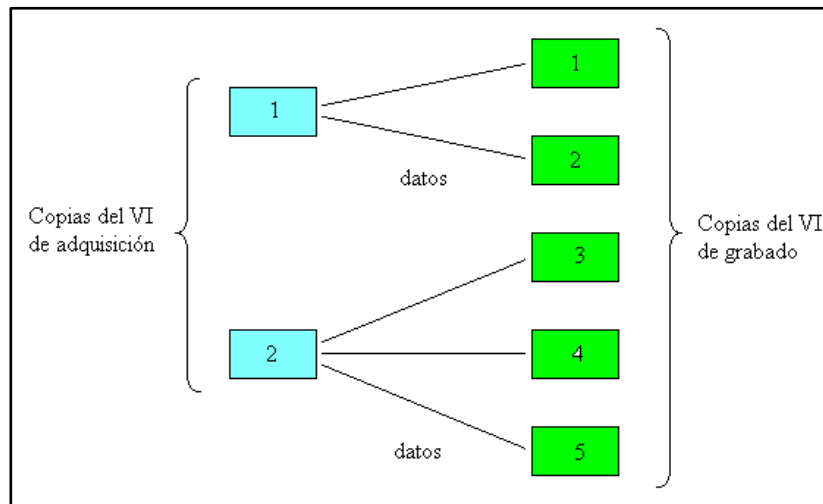


Figura 3.30. Copias de los VIs de adquisición y grabado.

Hasta aquí se tienen dos copias del VI de adquisición y cinco copias del VI de grabado corriendo de forma independiente, pero se necesita una manera de pasar los datos que están adquiriendo las copias del VI de adquisición a las copias del VI de grabado que requieran estos datos. Precisamente, la manera más conveniente de hacer esto es utilizando los notficadores en su función de demultiplexores. En este caso, cada copia del VI de adquisición tiene un notficador en donde deposita los datos que adquiere. Así, para el ejemplo propuesto, se tendría un notficador para el puerto 1 y otro notficador para el puerto 2. Cada copia del VI de grabado conoce de su configuración el nombre del puerto de donde debe recibir datos y por tanto, también conoce el nombre del notficador en donde se están depositando los datos que requiere. De esta manera, cada copia del VI de grabado suspende su ejecución hasta que haya datos en sus respectivos notficadores.

Una vez descrita la idea general para la implementación de la adquisición y el grabado de datos, se procederá a la descripción de los subVIs y diagramas de bloques que les dan funcionalidad a las opciones *Modo registro* y *Modo prueba*.

Llamado de los VIs de adquisición y grabado de datos

Al seleccionar la opción *Modo registro* o la opción *Modo prueba* se manda a llamar a un subVI que verifica la existencia de los archivos y carpetas necesarias para iniciar la adquisición (ver figura 3.31).

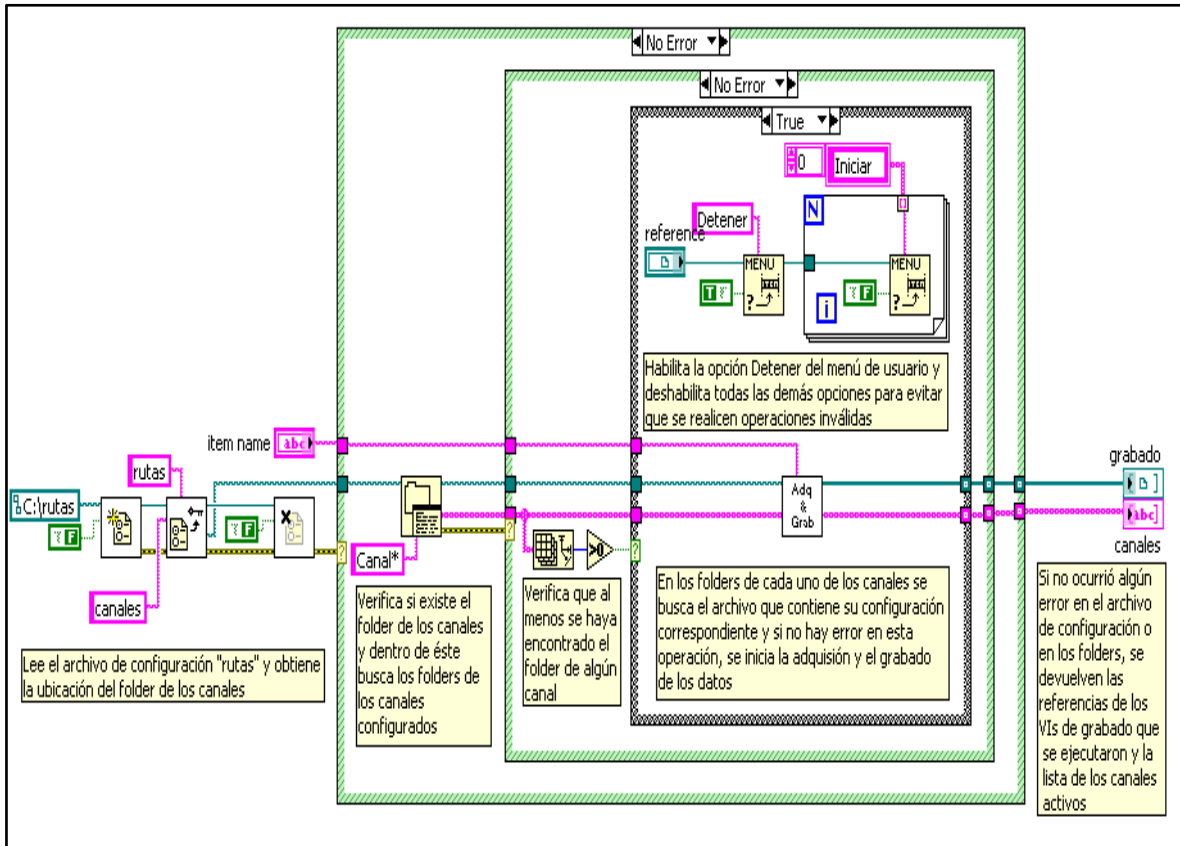


Figura 3.31. SubVI que verifica condiciones de error antes de la adquisición.

La manera en que funciona este subVI es la siguiente:

Primero se busca el archivo de configuración rutas, en caso de que éste se encuentre, se lee la ruta de la carpeta de los canales, de lo contrario quiere decir que no se ha establecido el directorio base, por lo que se avisa de esto en un cuadro de diálogo y no se inicia la adquisición. Después, dentro de la carpeta canales se verifica que exista la carpeta de algún canal. Si se encuentra la carpeta de uno o más canales, se almacenan sus nombres en un arreglo, sino se despliega un cuadro de diálogo para avisar que no se ha configurado ningún canal y no se inicia la adquisición. Luego, se deshabilita la opción *Detener* del menú *Adquisición* y se manda a llamar a un subVI, para que utilizando el arreglo con los nombres de los canales, encuentre sus respectivos archivos de configuración e inicie la adquisición y en su caso, el grabado de datos. Finalmente, este último subVI devuelve los nombres y las referencias de los VIs que se pueden utilizar para graficar los canales.

Para la explicación del subVI que inicia la adquisición y el grabado de datos se puede dividir en cuatro secciones.

La sección 1 se muestra en la figura 3.32. La tarea de esta sección es abrir los archivos de configuración de todos los canales y almacenar su contenido en un arreglo de *clusters* denominado arreglo de configuraciones. La manera en que se hace esto es utilizando un ciclo *for* y dentro de éste un subVI como el de la figura 3.33, el cual lee el contenido de un archivo de configuración y devuelve su contenido en un *cluster*. Este *cluster* contiene la ruta de registro, el nombre del canal, el código de la estación, la componente, el puerto, el canal físico, la frecuencia de muestreo, el modo de grabado, el tamaño en minutos y el tamaño en días. En el ciclo *for* se utiliza un registro de corrimiento para agregar cada uno de los *clusters* que devuelve el subVI al arreglo de configuraciones. En caso de que no se encuentre la carpeta de registro de un canal, aun cuando se encuentre su archivo de configuración, no se agrega su contenido al arreglo de configuraciones y se manda a avisar en la ventana de mensajes de este error. En caso de que no se encuentre el archivo de configuración de un canal o se obtenga un error durante su lectura, se avisa en la ventana de mensajes de este error. Todos los avisos que se pasan a la *Ventana de mensajes* utilizan la cola monitor.

Cuando se termina la ejecución de la sección 1, se determina el tamaño del arreglo de configuraciones. Si el tamaño de este arreglo es igual a cero, quiere decir que los canales proporcionados no tienen su archivo de configuración o su carpeta de registro, por lo que no se puede iniciar la adquisición y el grabado de datos y se avisa de esta situación en la *Ventana de mensajes*. Si el tamaño de este arreglo es mayor a cero, quiere decir que por lo menos hay un canal para el que se puede realizar la adquisición y el grabado de datos y se procede a la ejecución de las secciones 2, 3 y 4.

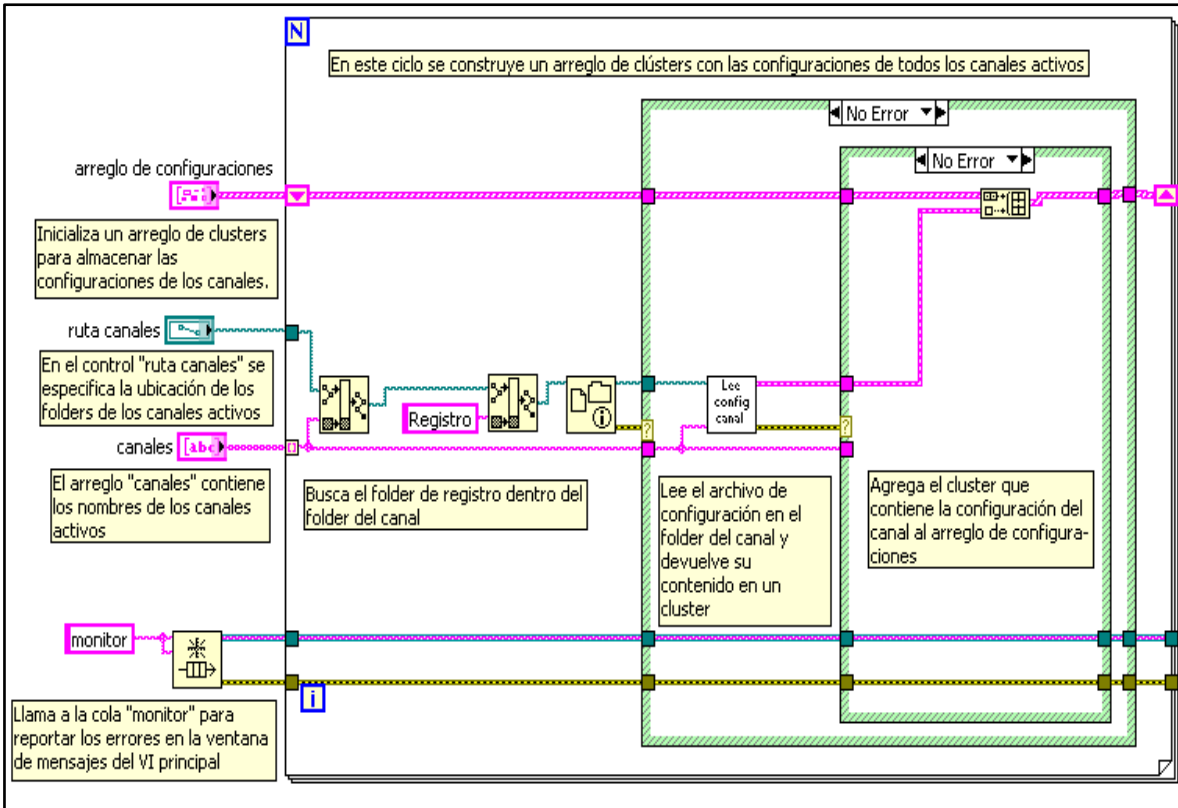


Figura 3.32. Sección 1 del subVI que inicia la adquisición y el grabado de datos.

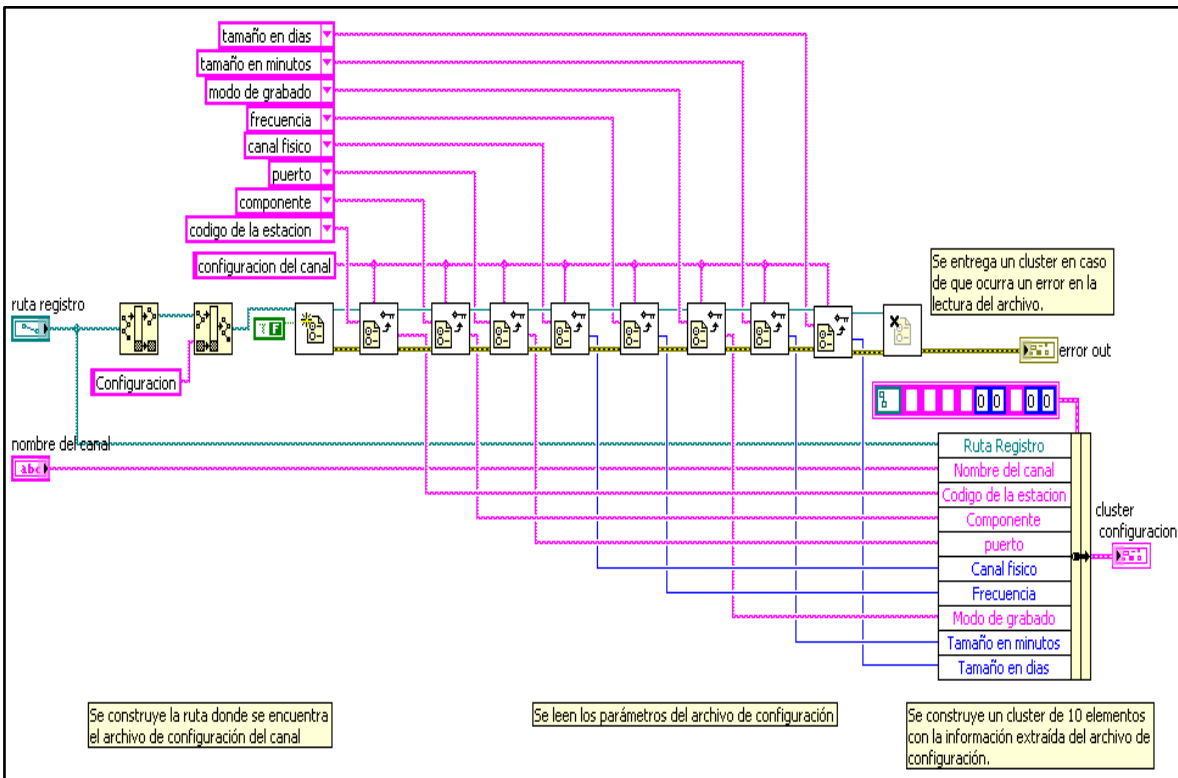


Figura 3.33. SubVI que lee el contenido del archivo de configuración de un canal.

La sección 2 se muestra en la figura 3.34. Esta sección se encarga de ejecutar tantos VIs de grabado como canales se tengan. Para esto se usa el tamaño del arreglo de configuraciones para establecer el número de iteraciones que se ejecutará un ciclo *for*. En cada iteración del ciclo *for* se abre un VI de grabado como *reentrant*, se establece los valores de inicio de sus controles y se ejecuta. Los valores que se pasan al VI de grabado son la configuración de un canal, la posición que ocupará este canal en el monitor de estado y un valor para indicar si se registrarán los datos o sólo se hará una prueba.

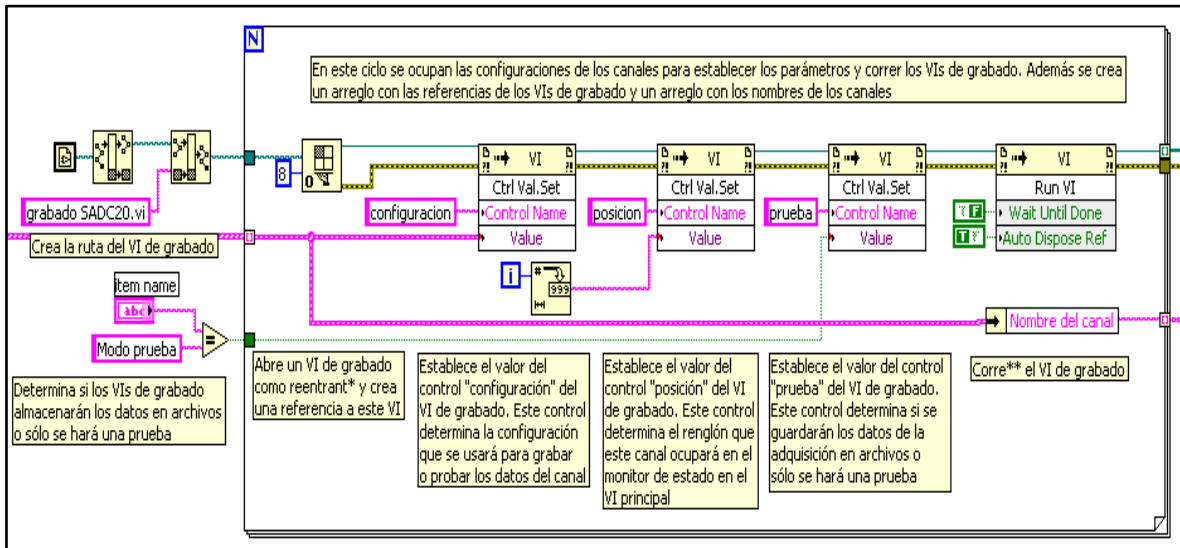


Figura 3.34. Sección 2 del subVI que inicia la adquisición y el grabado de datos.

La sección 3 (ver figura 3.35) es la encargada de extraer el nombre del puerto y de la frecuencia que se configuró en cada canal, para organizarla en un arreglo de puertos y en un arreglo de frecuencias, respectivamente. Para esto, se utiliza un ciclo *for* en donde en cada iteración se toma un elemento del arreglo de configuraciones y de ese elemento se extrae el nombre del puerto y la frecuencia. Después, se verifica si el nombre del puerto ya existe en el arreglo de puertos. Si ya existe el nombre del puerto, no se agrega al arreglo de puertos y la frecuencia no se agrega al arreglo de frecuencias. Si no existe el nombre del puerto, se utiliza un registro de corrimiento para agregar el nombre del puerto al arreglo de puertos y se utiliza otro registro de corrimiento para agregar la frecuencia al arreglo de frecuencias. Así, al terminar su ejecución el ciclo *for* se tendrá un arreglo de puertos de *n* elementos no repetidos y un arreglo de frecuencias de *n* elementos.

La sección 4 (ver figura 3.36) se utiliza para ejecutar tantos VIs de adquisición como dispositivos necesiten los canales configurados. En esta sección se toma el tamaño del arreglo de puertos para determinar el número de iteraciones que se ejecutará un ciclo *for*. En cada iteración del ciclo *for* se abre un VI de adquisición como *reentrant* y se utiliza un elemento del arreglo de puertos y un elemento del arreglo de frecuencias para establecer los valores de los controles del VI de adquisición. Después, se espera a que termine su ejecución la sección 2 e inmediatamente se corren todos los VIs de adquisición utilizando otro ciclo *for*.

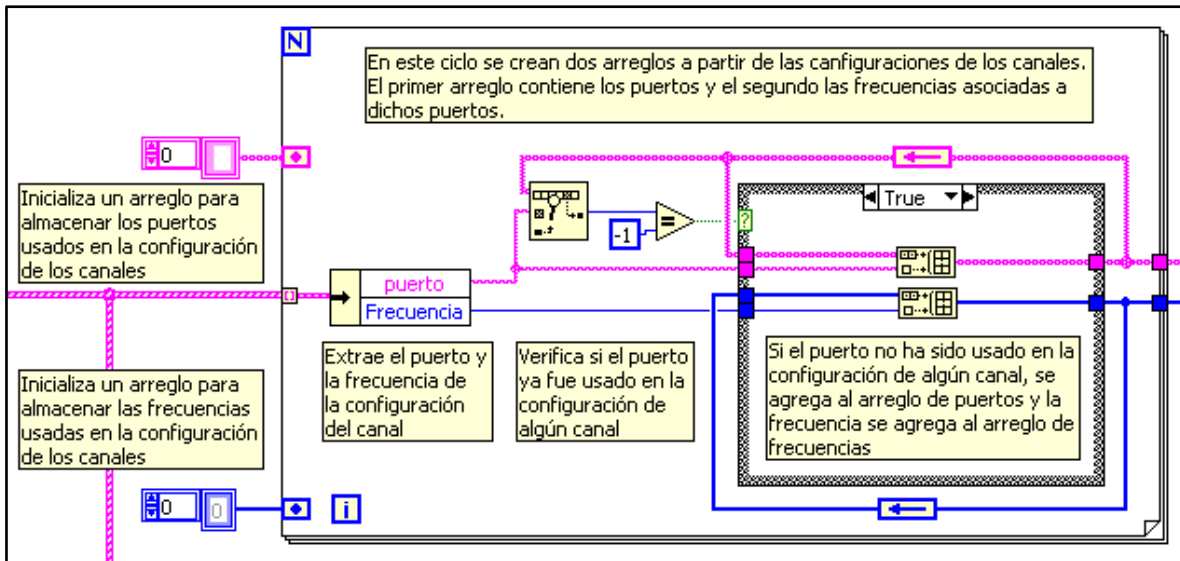


Figura 3.35. Sección 3 del subVI que inicia la adquisición y el grabado de datos.

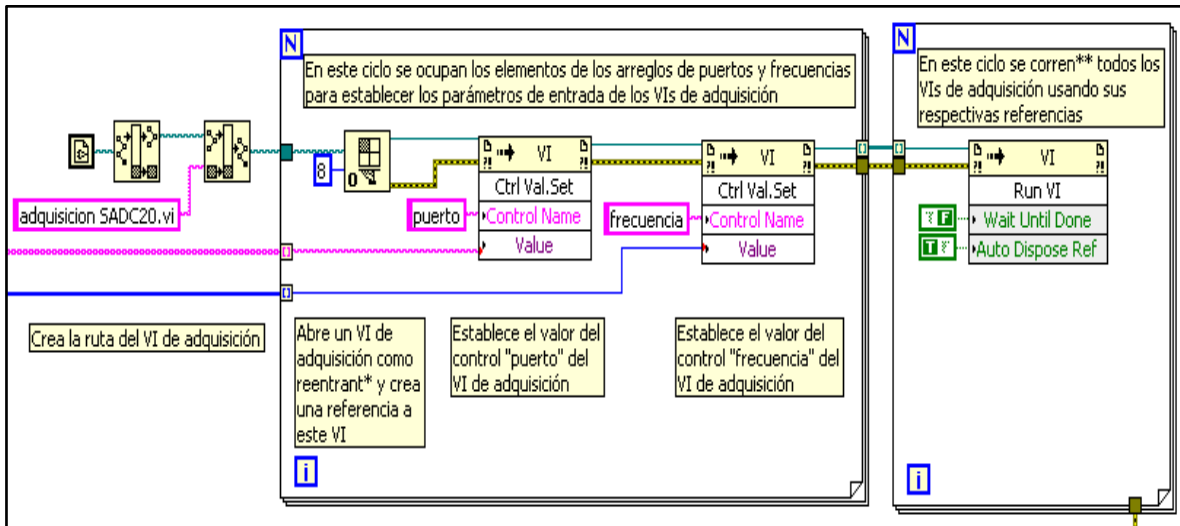


Figura 3.36. Sección 4 del subVI que inicia la adquisición y el grabado de datos.

El VI de Adquisición

El VI de adquisición es el encargado de adquirir los datos provenientes de una unidad sísmica y ponerlos disponibles para los VI de grabado que los necesiten. Para efectuar dicha tarea el VI de adquisición tiene un diagrama de bloques como el que se presenta en la figura 3.37. El funcionamiento de este diagrama de bloques es como sigue:

Se tienen dos controles de entrada: puerto y frecuencia. En el control puerto se especifica el nombre del puerto donde está conectada la unidad sísmica y se utiliza como parámetro de entrada de un subVI para configurar el puerto. Una vez que se configura el puerto, se utiliza el control frecuencia como parámetro de entrada de un subVI, para programar la frecuencia de muestreo de la unidad sísmica y después dentro de un ciclo *while* se leen los datos. En cada iteración de este ciclo *while* se utiliza un subVI para leer un

bloque de datos correspondiente a un segundo de adquisición, se decodifica el tiempo y los datos de cada canal y se escriben los datos decodificados a un notificador, cuyo identificador es el nombre del puerto, para que estén disponibles a todos los VIs de grabado que los requieran. El ciclo *while* se detiene hasta que se escribe un valor verdadero en la variable global *stop*. En este VI se consideran algunas condiciones de error como son: que no se pueda configurar el puerto y que se desconecte la unidad sísmica. Para ambos casos se utiliza la cola monitor para avisar del error en la *Ventana de mensajes*. Al terminar su ejecución, este VI destruye su notificador ocasionando que detengan su ejecución todos los VIs de grabado que estén esperando datos de este notificador.

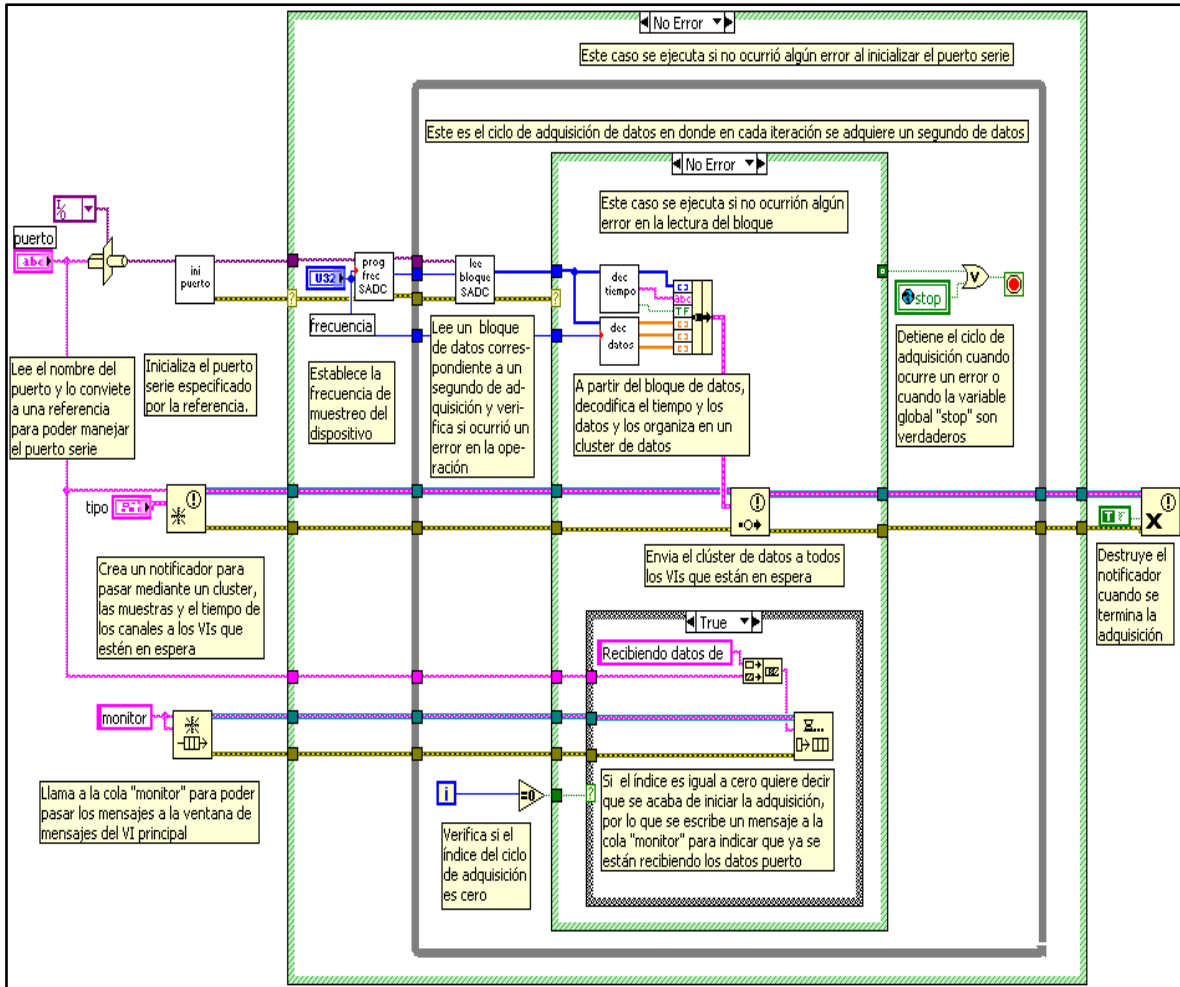


Figura 3.37. VI de adquisición.

El subVI que efectúa la configuración del puerto se muestra en la figura 3.38. En este subVI se establece la configuración del puerto de acuerdo a lo especificado por el fabricante en el protocolo de comunicación. Después se borra los datos que conserve el buffer serie, se espera un momento para que se fijen los parámetros configurados al puerto serie y se establece el tamaño del *buffer* serie de entrada de la computadora a 6600 *bytes*. El número máximo de datos que se espera recibir cada segundo es 3009 *bytes*, pero para asegurar que no se sature el *buffer* serie se escogió el valor de 6600 *bytes*.

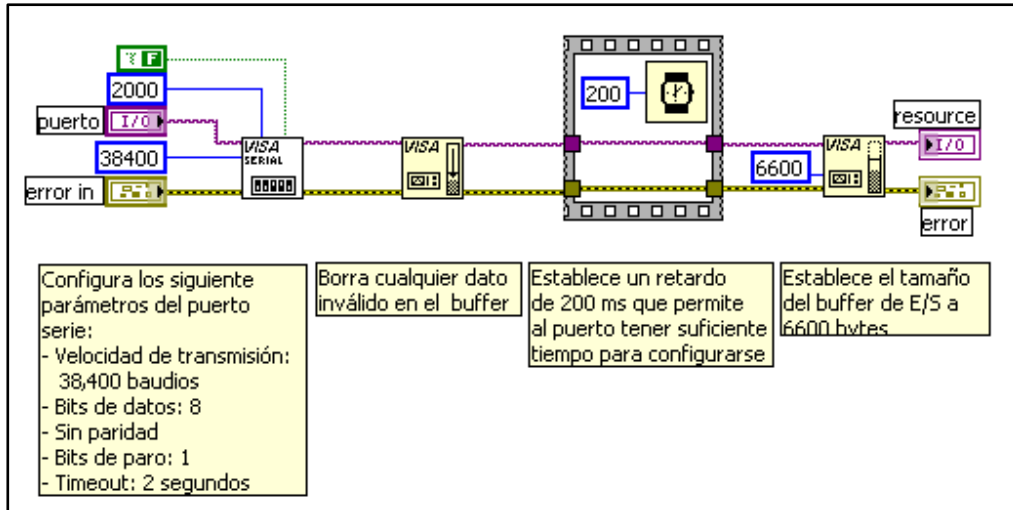


Figura 3.38. SubVI para configurar el puerto.

El subVI que se utiliza para programar la frecuencia de muestreo de la unidad sísmica se puede observar en la figura 3.39. En este subVI se construye el comando de ajuste de frecuencia como sigue: se usa el valor del control frecuencia para calcular los parámetros sps1, sps2 y sps3, se agrega el identificador del comando 132 (0x84) al inicio de estos tres parámetros y se agregan dos ceros al final de estos tres parámetros. Después se convierte el comando de ajuste de frecuencia a caracteres ASCII para escribirlos al puerto serie y se programe la frecuencia de muestreo. En este VI también se calcula el tamaño en bytes de un bloque de datos correspondiente a un segundo.

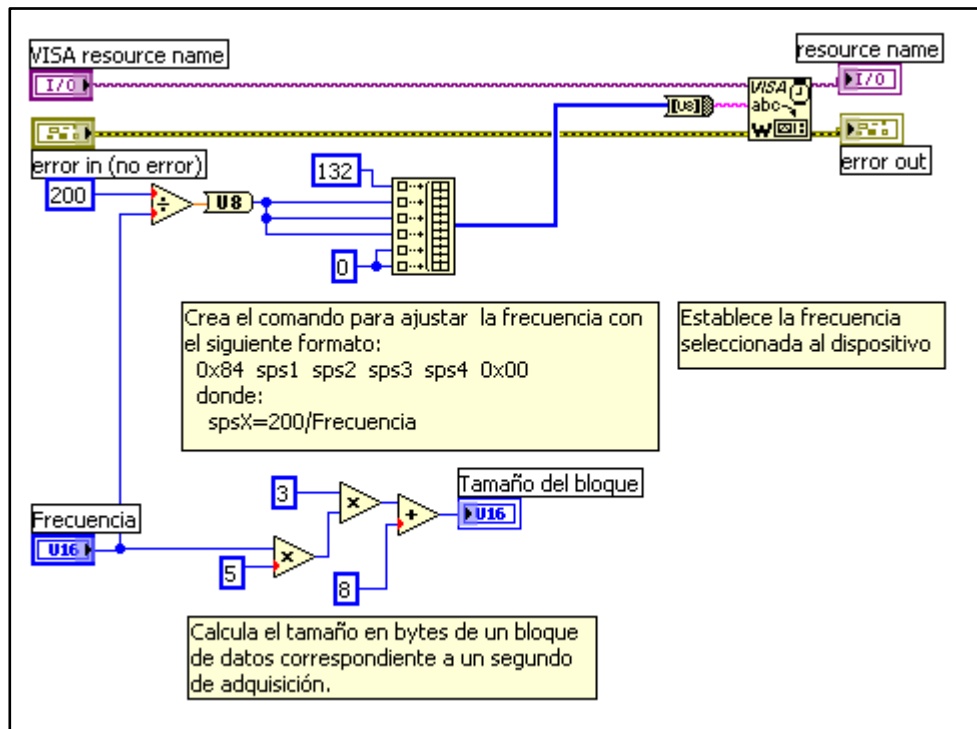


Figura 3.39. SubVI para establecer la frecuencia de muestreo.

El subVI para leer un bloque de datos correspondiente a un segundo de adquisición se muestra en la figura 3.40. En este subVI se tiene un ciclo *while*, en donde en cada iteración se lee un *byte* del puerto serie, hasta encontrar el identificador de tiempo 129 (0x81). Una vez que se encuentra el identificador de tiempo, se detiene el ciclo *while* y se lee un bloque de datos del puerto serie. Este bloque de datos contiene la información del tiempo y la información de los tres canales físicos correspondiente a un segundo de adquisición.

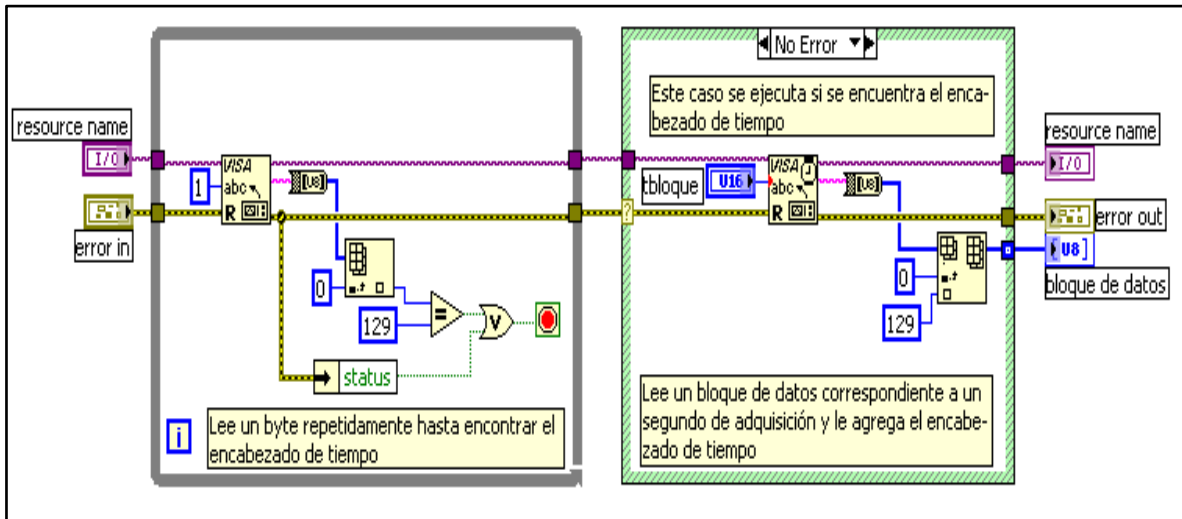


Figura 3.40. SubVI para leer un bloque correspondiente a un segundo de adquisición.

Para obtener la información del tiempo a partir del bloque de datos se utiliza el subVI de la figura 3.41.

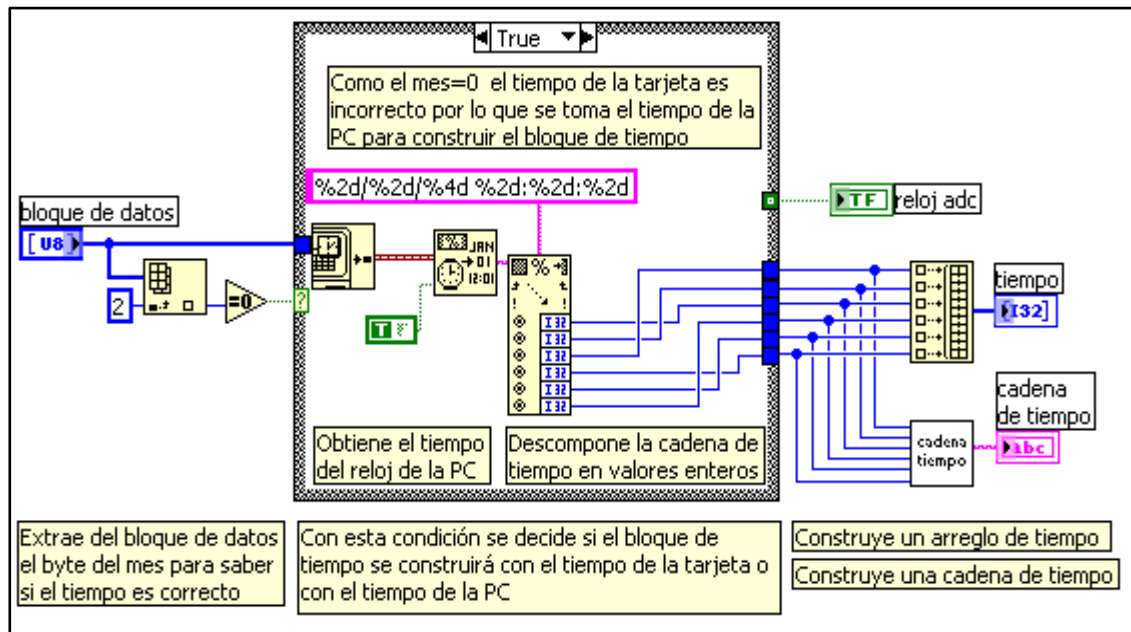


Figura 3.41. SubVI para obtener la información del tiempo.

La manera en que funciona el subVI para obtener la información del tiempo es la siguiente:

En el bloque de datos el primer *byte* es el identificador de tiempo y los seis *bytes* siguientes contienen la información del tiempo, en el siguiente orden: año, mes, día, segundo, minuto y hora. Para verificar si la información del tiempo enviada por la unidad sísmica es correcta, se verifica si el *byte* del mes es igual a cero. Si el *byte* del mes es cero, quiere decir que la unidad sísmica se acaba de conectar y la información del tiempo es incorrecta, por lo que se devuelve un valor falso para indicarlo y se utiliza el reloj de la computadora para reemplazar la información del tiempo. Si el *byte* del mes es diferente de cero, quiere decir que la información del tiempo enviada por la unidad sísmica ya fue actualizada por su receptor GPS, por lo que se devuelve un valor verdadero para indicarlo y no se altera la información del tiempo. Después, con la información del tiempo se construye un arreglo de tiempo y una cadena de tiempo. La cadena de tiempo se construye de acuerdo al siguiente formato: *dd.mm.aa hh:mn:ss*, donde *dd* es el día, *mm* es el mes, *aa* es el año, *hh* es la hora, *mn* es el minuto y *ss* es el segundo.

Para obtener la información de los tres canales físicos, a partir del bloque de datos, se hace uso del subVI mostrado en la figura 3.42. Mediante este programa, la información de cada uno de los canales es separada, decodificada y almacenada en tres arreglos (uno por canal).

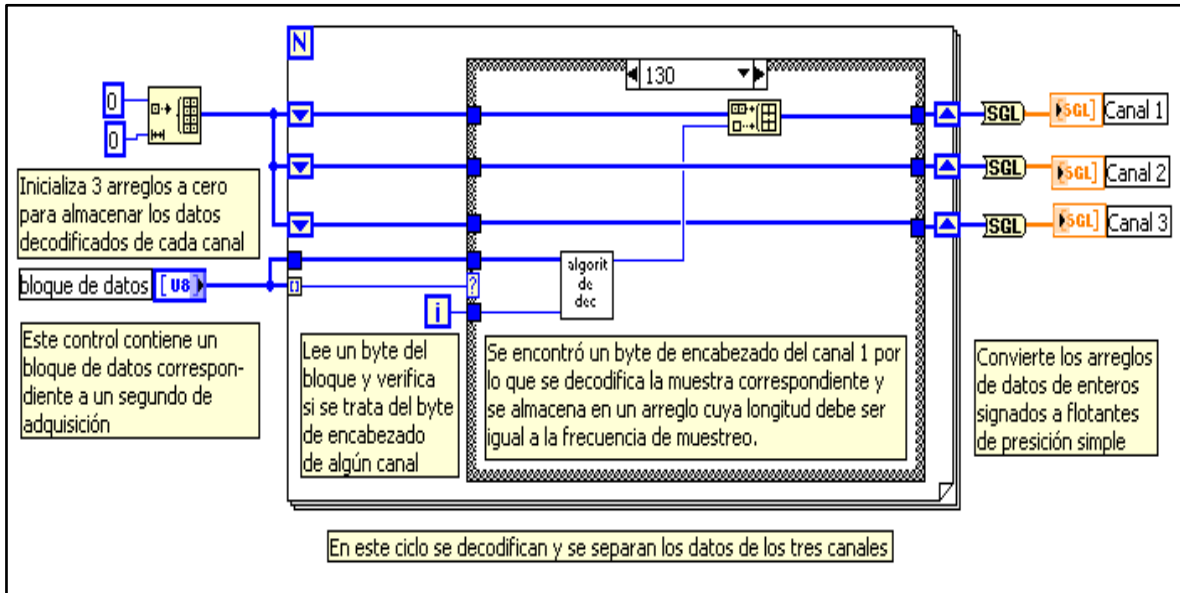


Figura 3.42. SubVI para decodificar los datos de los canales de la unidad sísmica.

En el diagrama de bloques de este subVI se tiene un ciclo *for*, en el que en cada iteración se realiza lo siguiente:

Se extrae un *byte* del bloque de datos y se verifica si corresponde al identificador de algún canal físico: 130 (0x82) para el canal 1, 131 (0x83) para el canal 2 y 132 (0x84) para el canal 3). Si el *byte* extraído coincide con el identificador de algún canal, se toma del

bloque de datos los cuatro *bytes* que estén después del *byte* extraído. Estos cuatro *bytes* representan los *bytes* bajo, medio, alto y extra/fin del paquete de un canal, por lo que se utilizan para aplicarlos al algoritmo de decodificación proporcionado por el fabricante para obtener un valor en *cuentas*. Dependiendo del identificador del canal que se haya encontrado, este valor en *cuentas* se deposita en uno de los tres arreglos.

El proceso descrito para cada iteración se ejecuta hasta terminar con todos los elementos del bloque de datos, de tal manera que al término de la ejecución del ciclo *for*, los tres arreglos contendrán tantos elementos como muestras haya en un segundo.

El VI de grabado

El panel frontal del VI de grabado (ver figura 3.43) es justamente la gráfica que se presenta al usuario en el subpanel *Gráfica* de VI principal, cada vez que selecciona un canal de la lista *Canales*. La función de todos los controles e indicadores que aparecen en el panel frontal de este VI, ya fueron tratados en la descripción de las opciones *Modo prueba* y *Modo registro*.

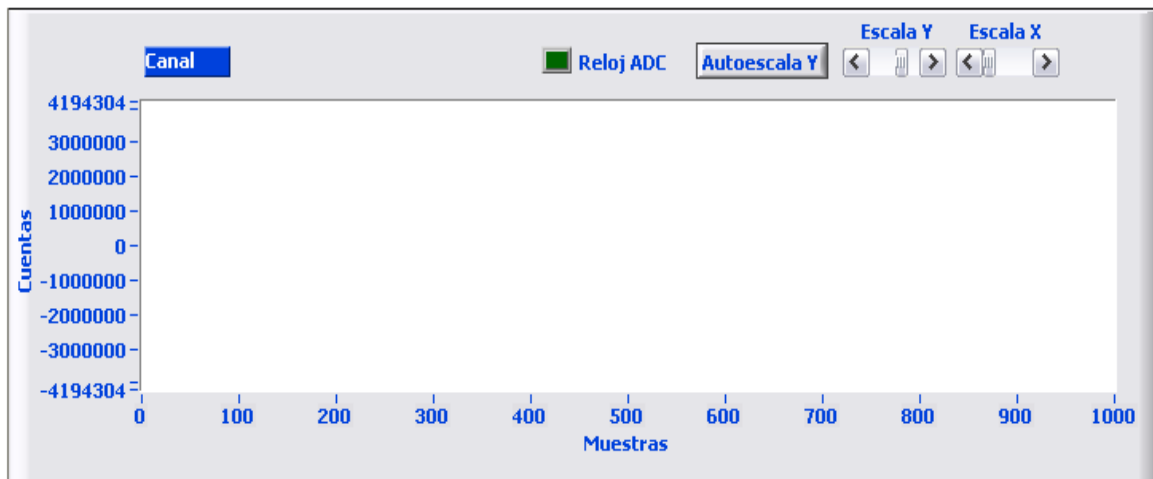


Figura 3.43. Panel frontal del VI de grabado.

El VI de grabado se encarga de recibir los datos enviados por el VI de adquisición, pasarlos a un subVI para grabar o monitorear los datos de un canal y controlar la gráfica que se muestra al usuario en la ventana principal, figuras 3.44 y 3.45. Para su explicación, el diagrama de bloques de este VI se puede dividir en dos secciones.

El diagrama de bloques de la sección 1 del VI de grabado se muestra en la figura 3.44. Al inicio de esta sección se tienen los controles *prueba*, *posición* y *configuración*, los cuales no son visibles en el panel frontal porque no deben ser manipulados por el usuario. El control *prueba* determina si se van a grabar los datos del canal o si sólo se van a monitorear, el control *posición* especifica el renglón que ocupará el resumen del canal en el monitor de estado del VI principal y el control *configuración* es un *cluster* que contiene los parámetros que fueron establecidos en la configuración del canal, como son: ruta de registro, nombre del canal, código de la estación, componente, puerto, frecuencia, canal

físico, modo de grabado, tamaño en minutos y tamaño en días. Los valores de inicio de estos controles son proporcionados por la sección 2 del subVI que inicia la adquisición y el grabado de datos (figura 3.34), haciendo uso del VI server. Una vez que se establecen los valores de estos controles, se inicializa a cero un *cluster* de acumuladores constituido por tres elementos: un acumulador para almacenar el tamaño del archivo, un acumulador para almacenar el valor máximo y un acumulador para almacenar el valor mínimo. También, del *cluster* de configuración se extrae el nombre del puerto para invocar al notificador en donde se están depositando los datos que utilizará el VI de grabado. Los datos que se están depositando en este notificador llegan en un *cluster* denominado tiempo-datos, el cual contiene el tiempo, el estado del tiempo (0 se toma de la computadora y 1 si se toma del ADC) y los datos de los tres canales físicos. Después, en cada iteración de un ciclo *while*, se lee el *cluster* de tiempo-datos que llega al notificador y se ingresa este *cluster* a un subVI llamado “graba datos”, el cual dependiendo de los valores del control *prueba*, del control *posición* y del *cluster* de configuración, graba o sólo monitorea los datos del canal. Este subVI entrega los datos del canal para graficarlos y un resumen del canal para reportarlo al *Monitor de estado* del VI principal. La ejecución del ciclo *while* se detiene cuando ocurre un error en el notificador ocasionado por el VI de adquisición.

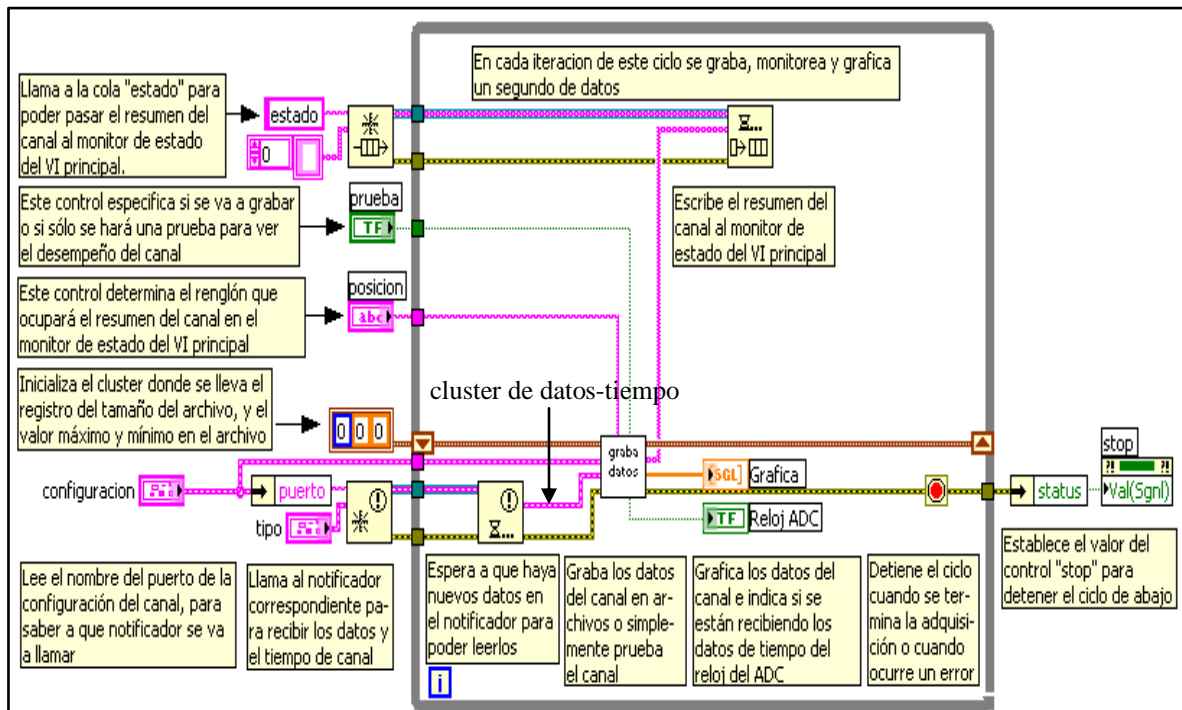


Figura 3.44. Sección 1 del VI de grabado.

La sección 2 del VI de grabado se muestra en la figura 3.45. En esta sección se tiene un ciclo *while* y dentro de éste una estructura para manejar los siguientes eventos:

- *Se modificó el valor del control Escala y.* En este caso se utiliza el valor de este control y un nodo de propiedad para establecer el valor máximo y el valor mínimo que tendrá la escala y de la gráfica del canal. Los valores que puede tomar este

control son desde 8 hasta 23, por lo que la escala y se puede ajustar dentro de un rango de $\pm 2^8 = \pm 256$ a $\pm 2^{23} = \pm 8388608$ cuentas.

- Se modificó el valor del control Escala x. En este caso se utiliza el valor de este control y un nodo de propiedad, para modificar la escala x de manera que se abarque cierto número de muestras en la gráfica del canal. El número de muestras que se pueden abarcar están en el rango de 1000 a 10000 muestras.
- Se presionó el botón Autoescala y. En este caso se utiliza un nodo de propiedad para autoajustar la escala y de la gráfica del canal.
- Se modificó el valor del control stop (no visible en el panel frontal). El valor de este control es falso cuando se inicia el VI de grabado, pero cuando el ciclo while de la sección 1 termina su ejecución, se escribe a este control un valor verdadero, lo que ocasiona que se modifique. Así que, en este caso se detiene la ejecución del ciclo while de la sección 2.

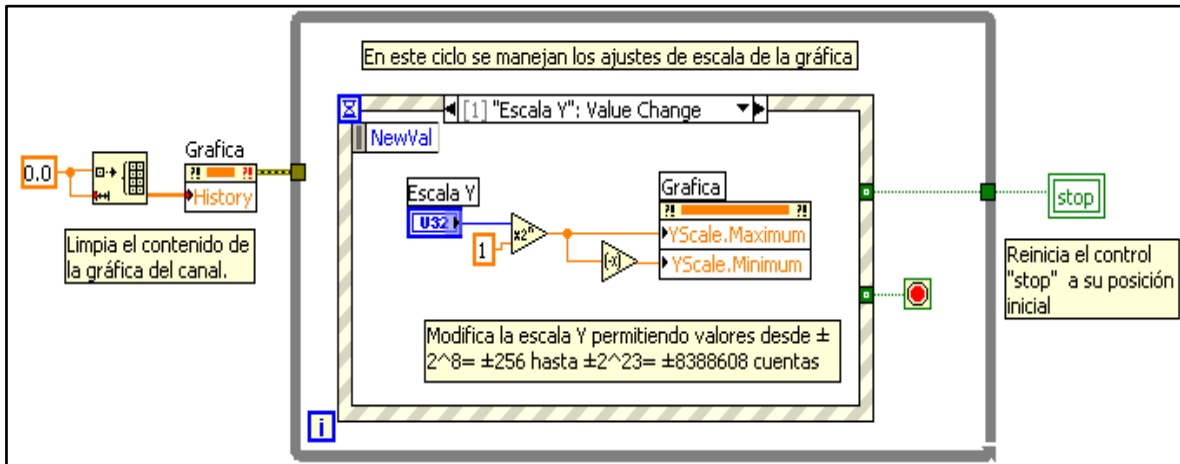


Figura 3.45. Sección 2 del VI del grabado.

El subVI “graba datos”, figura 3.46 y 3.47, utilizado en el VI de grabado, tiene los siguientes parámetros de entrada: el *cluster* de datos-tiempo que llega al notificador, el valor del control prueba, el valor del control posición, el valor del *cluster* de configuración y el valor del *cluster* de acumuladores. El diagrama de bloques de este subVI se puede dividir, por las funciones que realiza, en dos secciones.

El diagrama de bloques de la sección 1, del subVI “graba datos”, se presenta en la figura 3.46, éste se encarga de entregar al VI de grabado los datos y el resumen del canal. Los datos del canal se toman del *cluster* tiempo-datos, dependiendo del canal físico especificado en el *cluster* de configuración. El resumen del canal es un arreglo de *strings* que se construye a partir de algunos parámetros contenidos en el *cluster* tiempo-datos y en el *cluster* de configuración. Los parámetros que incluye el resumen del canal son: la posición que ocupará el canal en el monitor de estado del VI principal, el canal lógico, el código de la estación, la componente, la fecha y la hora GMT, una muestra de los datos del canal, el nombre del archivo a donde se están grabando los datos o el mensaje “Modo

prueba” si sólo se está monitoreando el canal, el puerto y el canal físico de donde se están tomando los datos.

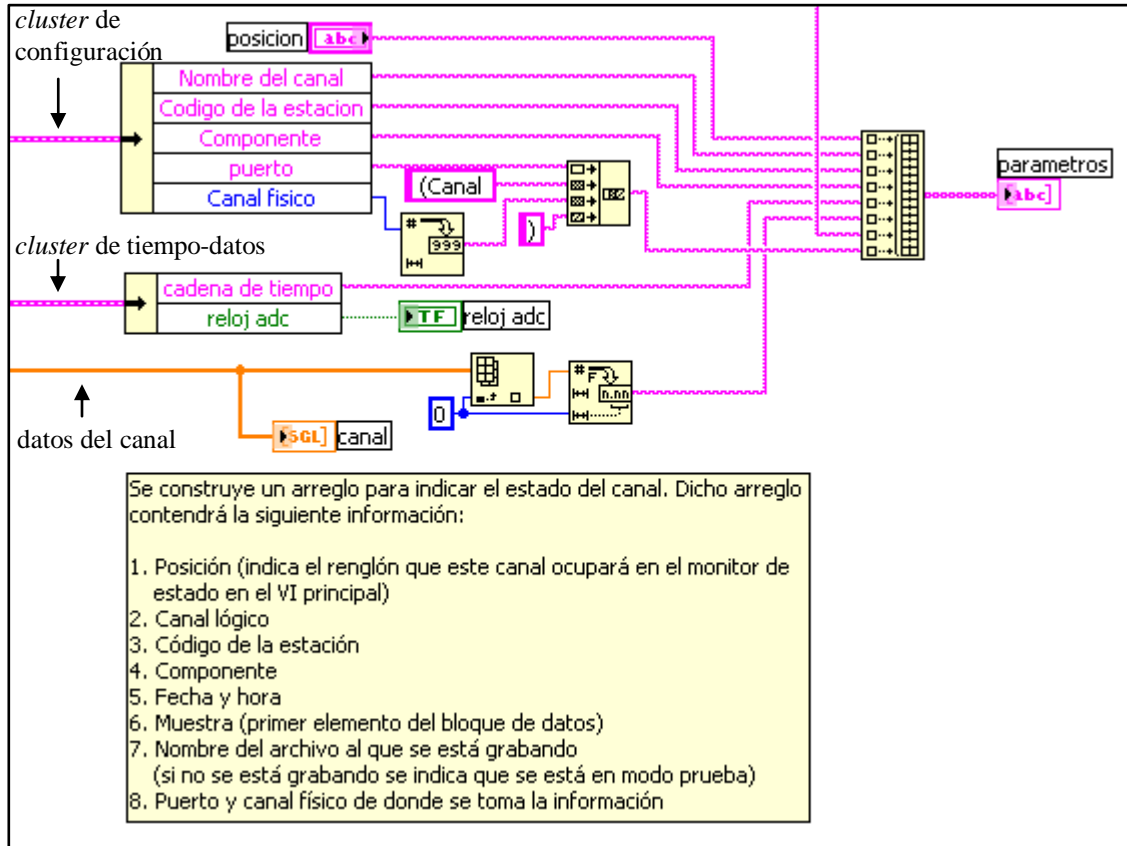


Figura 3.46. Sección 1 del subVI "graba datos".

La sección 2 del subVI "graba datos" se emplea para grabar los datos en archivos con formato SAC binario o sólo para monitorearlos. Para ello, en esta sección se lee el valor del control prueba para manejar una estructura *case*. La opción verdadera de esta estructura *case* corresponde a cuando sólo se van a monitorear los datos, por lo que esta opción no contiene código y sólo entrega un mensaje a la sección 1 para indicar que se está en *Modo prueba*. La opción falsa corresponde a cuando se registran los datos en un archivo, por lo que esta opción entrega a la sección 1 el nombre del archivo donde se están grabando los datos. El registro de datos en un archivo se lleva a cabo en tres etapas.

Etapa 1

La etapa 1, cuyo diagrama de bloques se presenta en la figura 3.47, es la encargada de la creación del archivo en donde se almacenarán los datos del canal. La condición para llevar a cabo esta etapa es que el acumulador que guarda el tamaño del archivo sea cero, lo cual quiere decir que se acaba de terminar de grabar información a un archivo o que se acaba de iniciar el VI grabado. Si una de estas condiciones se cumple, se ingresan algunos parámetros del *cluster* de configuración y algunos datos contenidos en el *cluster* tiempo-datos (tiempo y estado del tiempo) a un subVI, para construir la ruta que tendrá el archivo. Después, se crea el archivo en la ruta especificada y se utiliza otro subVI para inicializar

todos los campos del encabezado SAC al valor por *default* (-12345) y para llenar con información algunos campos del encabezado SAC. Luego, de acuerdo al canal físico especificado en el *cluster* de configuración, se toman los datos del canal del *cluster* de tiempo-datos para escribirlos al archivo. Finalmente, se calcula el tamaño del archivo en *bytes*, se obtienen los valores máximo y mínimo de los datos escritos y se almacenan en el *cluster* de acumuladores.

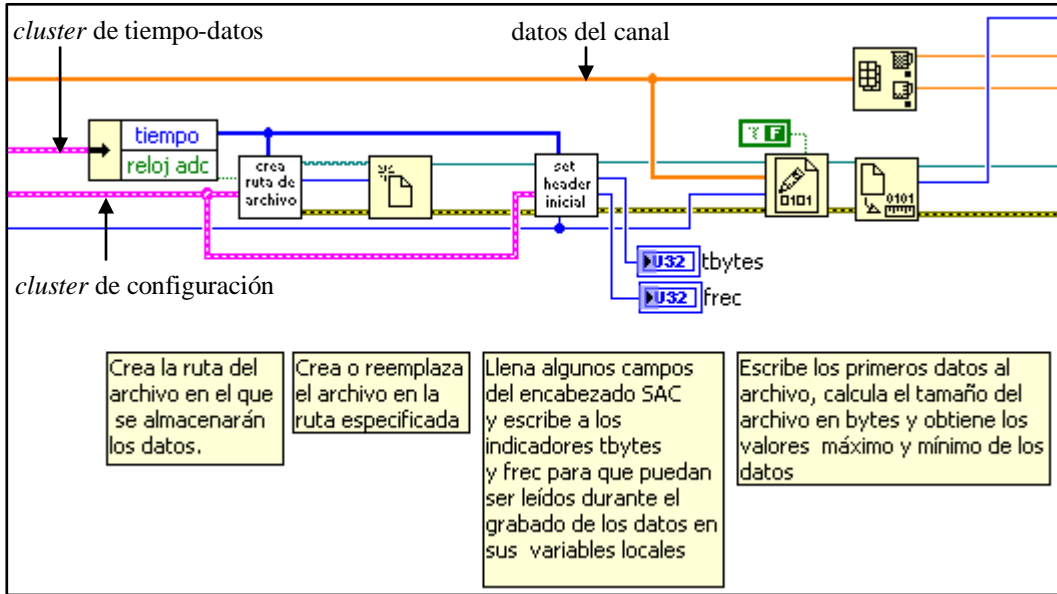


Figura 3.47. Creación de un archivo con formato SAC binario.

El subVI que se utiliza para construir la ruta del archivo se muestra en la figura 3.48.

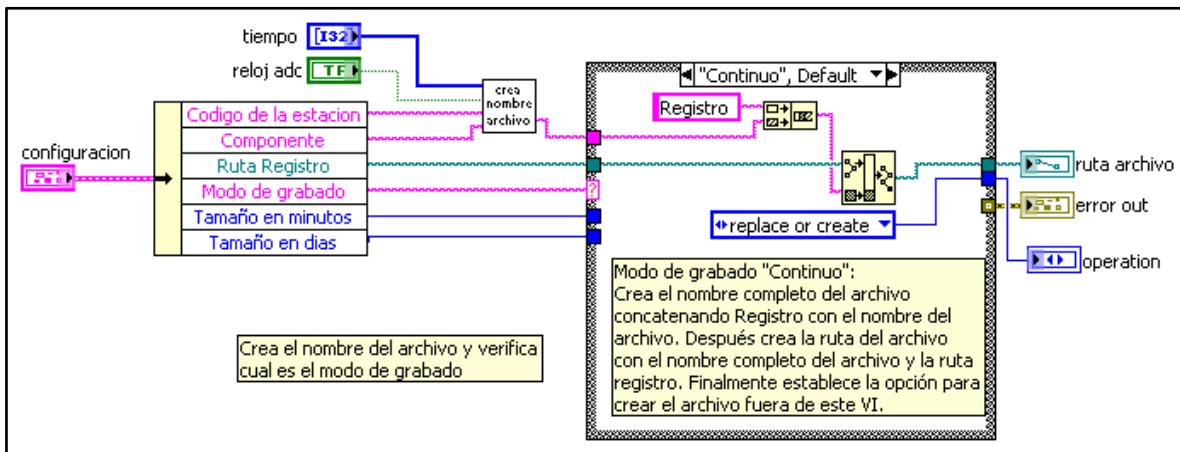


Figura 3.48. SubVI para construir la ruta del archivo.

En el diagrama de bloques de la figura 3.48, se observa que primero se ingresan a un subVI los datos del tiempo, el estado del reloj del ADC, el código de la estación y la componente, para crear el nombre corto del archivo de acuerdo al siguiente formato: *aaaa-mm-dd_hhmm-ss_t_cod-comp.sac*, donde *aaaa* es el año, *mm* es el mes, *dd* es el día, *hhmm*

es la hora y el minuto, *ss* es el segundo, *t* indica si el tiempo es el de la computadora (0) o el del ADC(1), *cod* es el código de la estación y *comp* es la componente. Después de realizado lo anterior, se verifica si el modo de grabado es continuo o *ringbuffer*. En caso de que el modo de grabado sea continuo, se antepone la leyenda “Registro” al nombre corto del archivo para crear el nombre completo del archivo. En caso de que el modo de grabado sea *ringbuffer*, se abre el archivo binario RB_Ctrl para conocer el número del archivo del *ringbuffer* (xxxx) y con este número se crea la leyenda “Rxxxx”, la cual posteriormente se antepone al nombre corto del archivo para crear el nombre completo del archivo. Al final se utiliza la ruta de registro y el nombre completo del archivo para construir la ruta completa del archivo que devuelve este subVI.

El subVI que se utiliza para establecer el encabezado SAC se muestra en la figura 3.49.

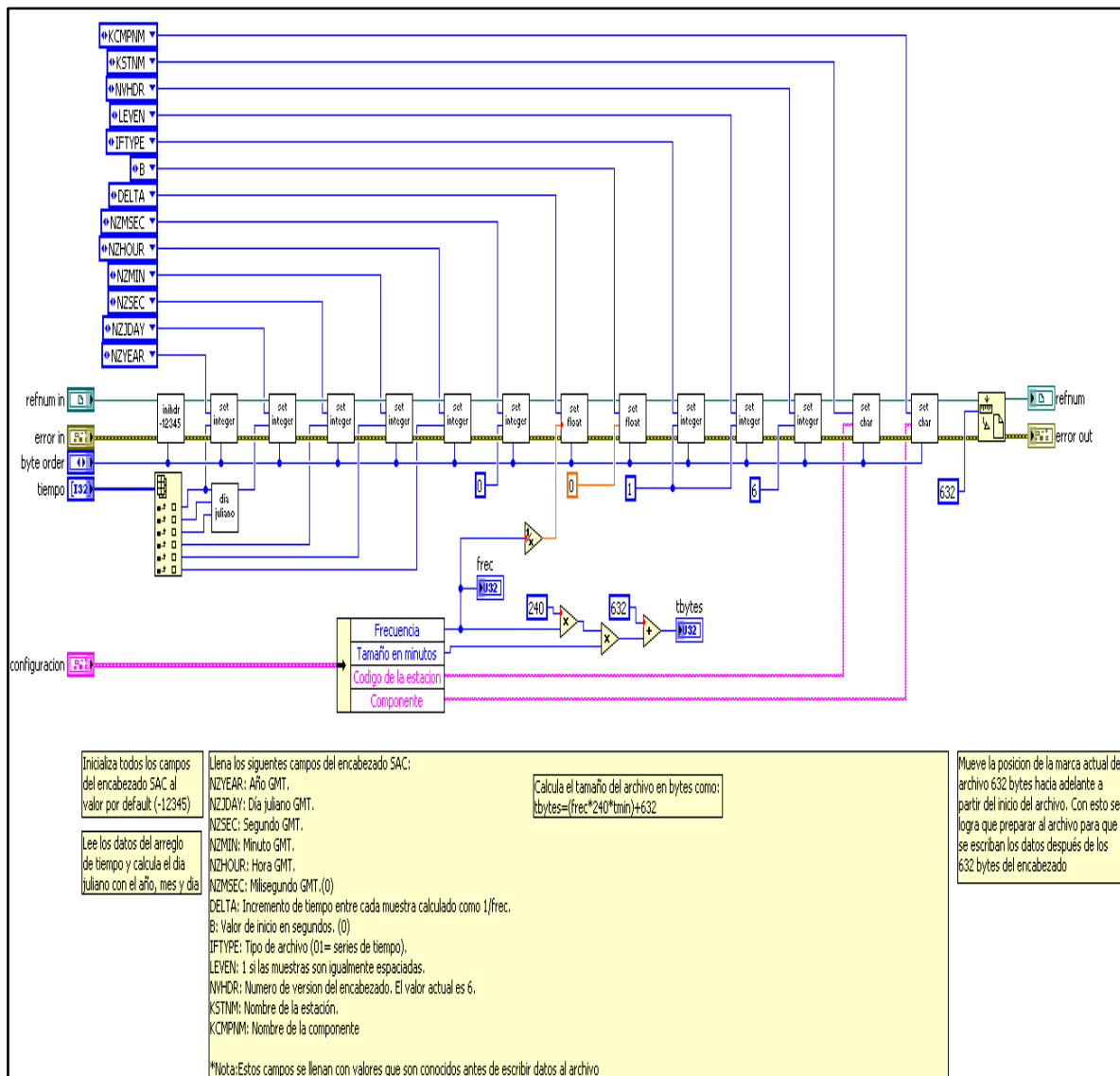


Figura 3.49. SubVI para establecer algunos campos del encabezado SAC.

El diagrama de bloques del subVI de la figura anterior funciona así:

Se utiliza un subVI para escribir en el archivo recién creado o reemplazado, en caso de que se trate del archivo de un *ringbuffer*, la siguiente información: un arreglo de 70 valores de tipo flotante, con sus elementos inicializados al valor -12345.000000; un arreglo de 40 valores de tipo entero, con sus elementos inicializados al valor 12345 y un arreglo de 24 *strings* de 8 caracteres, con sus elementos inicializados al valor “-12345 ”. Todo esto con la intención de inicializar todos los campos del encabezado SAC a sus valores por *default*. Enseguida se llenan algunos campos del encabezado SAC con algunos parámetros proporcionados en el *cluster* de configuración y en el *cluster* de tiempo-datos. Los campos del encabezado SAC que se llenan son: NZYEAR (año GMT), NZJDAY (día juliano GMT), NZSEC (segundo GMT), NZMIN (minuto GMT), NZHOUR (Hora GMT), NZMSEC (milisegundo GMT), DELTA (Incremento de tiempo entre cada muestra definido como 1/frecuencia), B (valor de inicio en segundos), IFTYPE (Tipo de archivo), LEVEN (1 si las muestras son igualmente espaciadas), NVHDR (Número de versión del encabezado), KSTNM (Nombre de la estación) y KCMPNM (Nombre de la componente). Para establecer el valor de cada uno de estos campos se utilizan tres subVIs distintos: uno para establecer los valores de tipo flotante, otro para establecer los valores de tipo entero y el último para establecer los valores de tipo *string*. Estos tres subVIs tienen una estructura muy semejante, por lo que solamente se presenta en la figura 3.50 el subVI para establecer un valor de tipo flotante en el campo seleccionado.

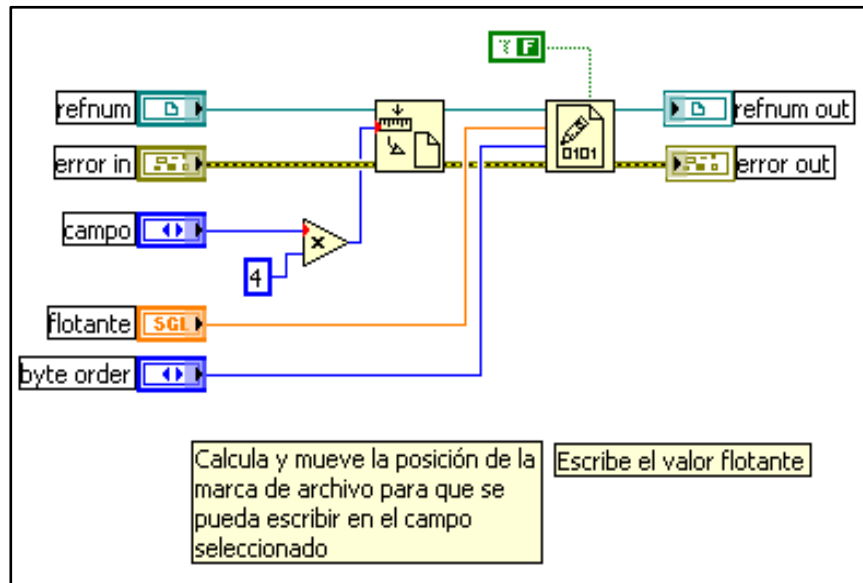


Figura 3.50. SubVI para establecer valor de tipo flotante en el encabezado SAC.

Una vez que se ha terminado de llenar algunos campos del encabezado SAC, a partir del inicio del archivo se mueve la posición de la marca del archivo 632 *bytes* hacia adelante, para que cuando se escriban los datos, éstos no se encimen sobre lo que se ya se escribió en el área del encabezado SAC. Los 632 *bytes* resultan de considerar que el encabezado SAC ocupa 70 campos flotantes de 4 *bytes* cada uno, 40 campos enteros de 4 *bytes* cada uno y 24 campos carácter de 8 *bytes* cada uno.

Etapa 2

La etapa 2, cuyo diagrama de bloques aparece en la figura 3.51, se encarga de escribir datos al archivo. La condición para que se pase a esta etapa es que el acumulador que contiene el tamaño del archivo sea mayor a cero, lo cual indicará que se ha pasado la etapa 1 y se tiene un archivo sobre el cual se puede escribir. Si esta condición se cumple, se toman los datos del canal físico del *cluster* de tiempo-datos, para escribirlos al archivo y se determinan los valores máximo y mínimo de los datos escritos. A continuación, se calcula el tamaño del archivo en *bytes*, para compararlo con el tamaño máximo especificado en la configuración. Si el tamaño del archivo en *bytes* es menor que el tamaño máximo especificado, quiere decir que se puede seguir escribiendo datos a este archivo, por lo que únicamente se actualiza el *cluster* de acumuladores. Si el tamaño del archivo en *bytes* es mayor o igual que el tamaño máximo, quiere decir que este archivo ya está lleno, por lo que se debe pasar a la etapa 3.

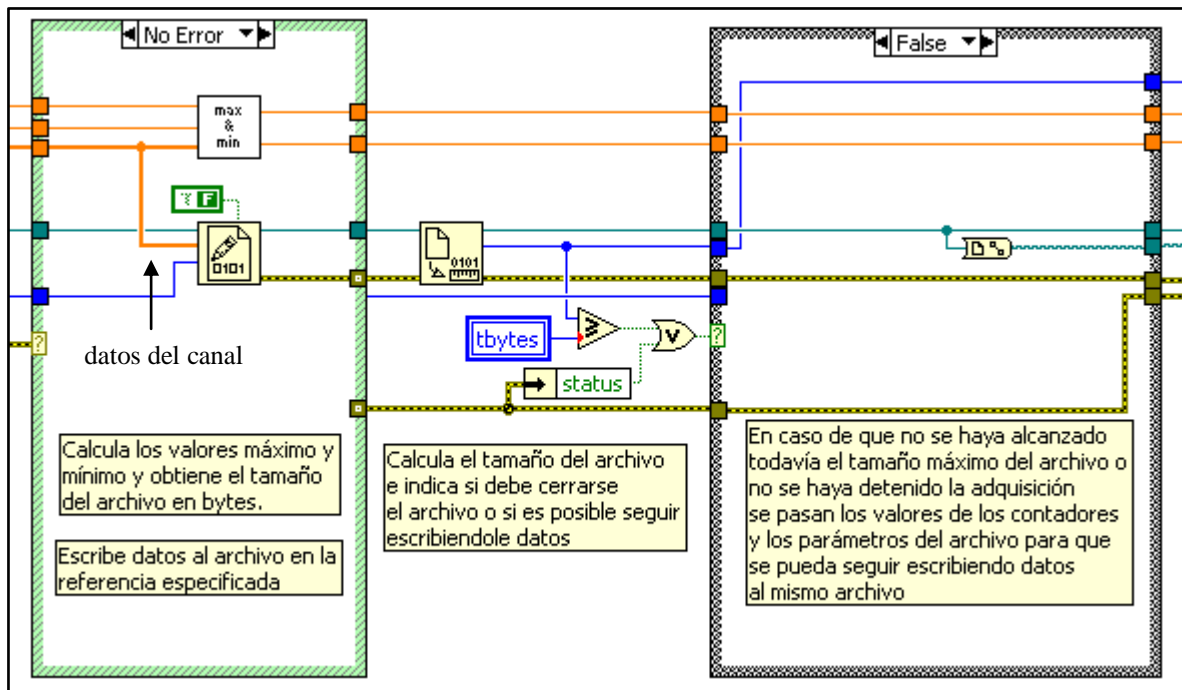


Figura 3.51. Escritura de datos a un archivo con formato SAC binario.

Etapa 3

La etapa 3 constituye el caso en el que se ha alcanzado el tamaño máximo en *bytes* del archivo en la etapa 2, o se ha detenido la adquisición. De manera que, la etapa 3 tiene como tarea principal llenar algunos campos del encabezado SAC, cerrar el archivo y reinicializar a cero los valores del *cluster* de acumuladores (ver figura 3.52). Una vez terminada la etapa 3, si no se ha detenido la adquisición, se pasa a la etapa 1 para iniciar el grabado de otro archivo.

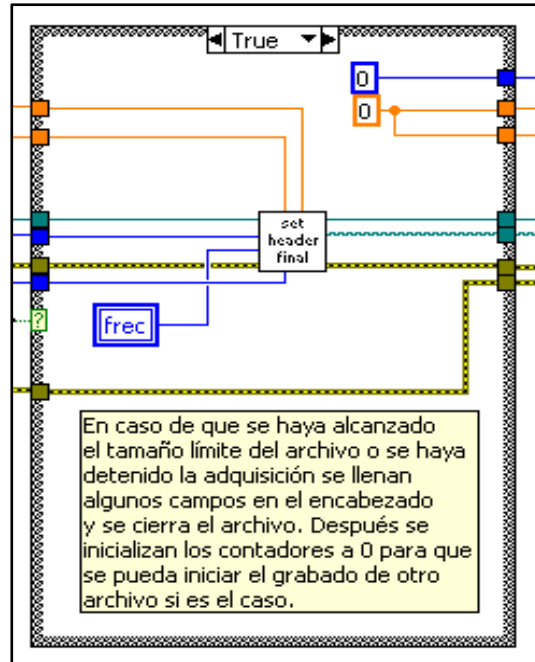


Figura 3.52. Cierre de un archivo con formato SAC.

El subVI que se presenta en la figura 3.53 es el encargado de establecer los valores de algunos campos que se conocen hasta que se termina de escribir datos al archivo. Los campos que se escriben son: DEPMIN (valor mínimo), DEPMAX (valor máximo), NPTS (número de puntos) y E (fin del archivo en segundos). Al terminar de escribir estos campos se cierra el archivo.

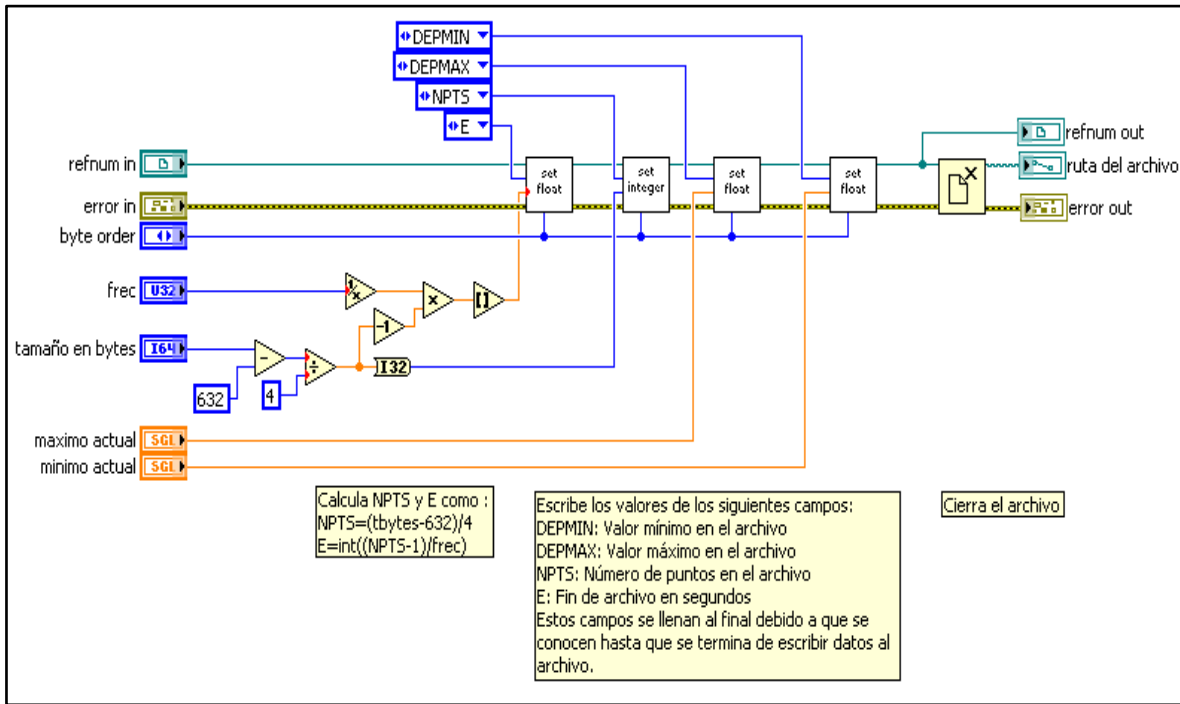


Figura 3.53. Escritura de algunos campos del encabezado SAC antes de cerrar un archivo.

Detener

La opción *Detener* tiene la finalidad de parar la ejecución de las opciones *Modo prueba* y *Modo registro*. Para realizar esta tarea se tiene un subVI, figura 3.54, el cual funciona de la siguiente manera:

Cuando el usuario selecciona la opción *Detener*, se despliega un cuadro de diálogo para preguntar si realmente se desea detener la adquisición. Si en el cuadro de diálogo el usuario cancela, no se detendrá la adquisición, pero si acepta se realizarán varias acciones. La acción principal que se realizará es detener a los VIs de adquisición, para lo cual se escribe un valor verdadero a la variable global *stop*. Cuando se detienen los VIs de adquisición, éstos generan un error en sus notificadoros, lo cual se transfiere a los VIs de grabado y hace que también se detengan. Otras acciones que se realizan y que son visibles en la ventana principal son: se deshabilita la opción *Detener* y se habilitan las opciones *Modo prueba* y *Modo registro* para que el usuario pueda iniciar otra vez la adquisición, se manda un mensaje a la *Ventana de mensajes* para avisar que se ha terminado la adquisición, se quita la gráfica del canal que esté en el subpanel *Gráfica* y se limpia el contenido de la lista *Canales*.

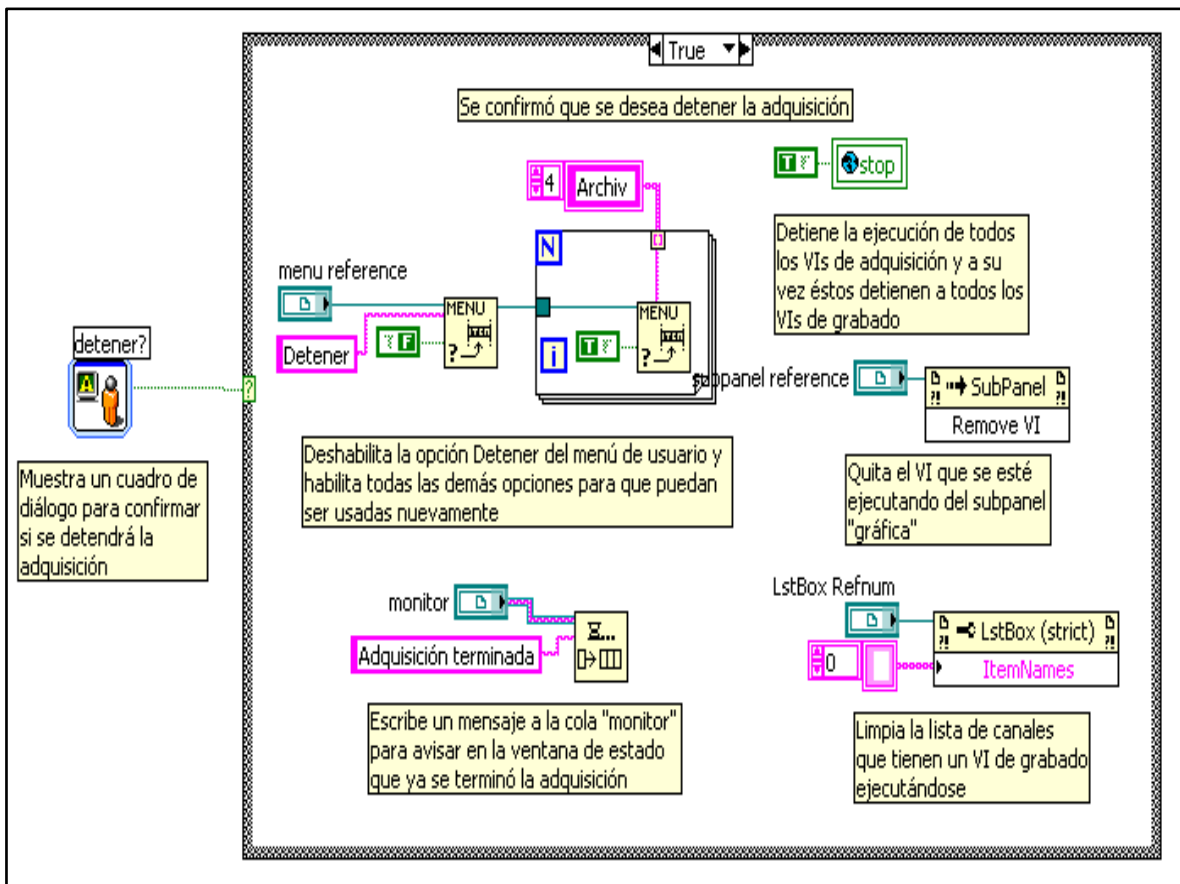


Figura 3.54. SubVI para detener la adquisición de datos.

3.3.4. Menú lectura

El menú *Lectura*, mostrado en la figura 3.55, se incorporó para que el usuario tenga la posibilidad de examinar el contenido de archivos con formato SAC.



Figura 3.55. Menú Lectura.

Si el usuario selecciona la opción *archivo SAC* del menú *Lectura*, se despliega una ventana como la de la figura 3.56.

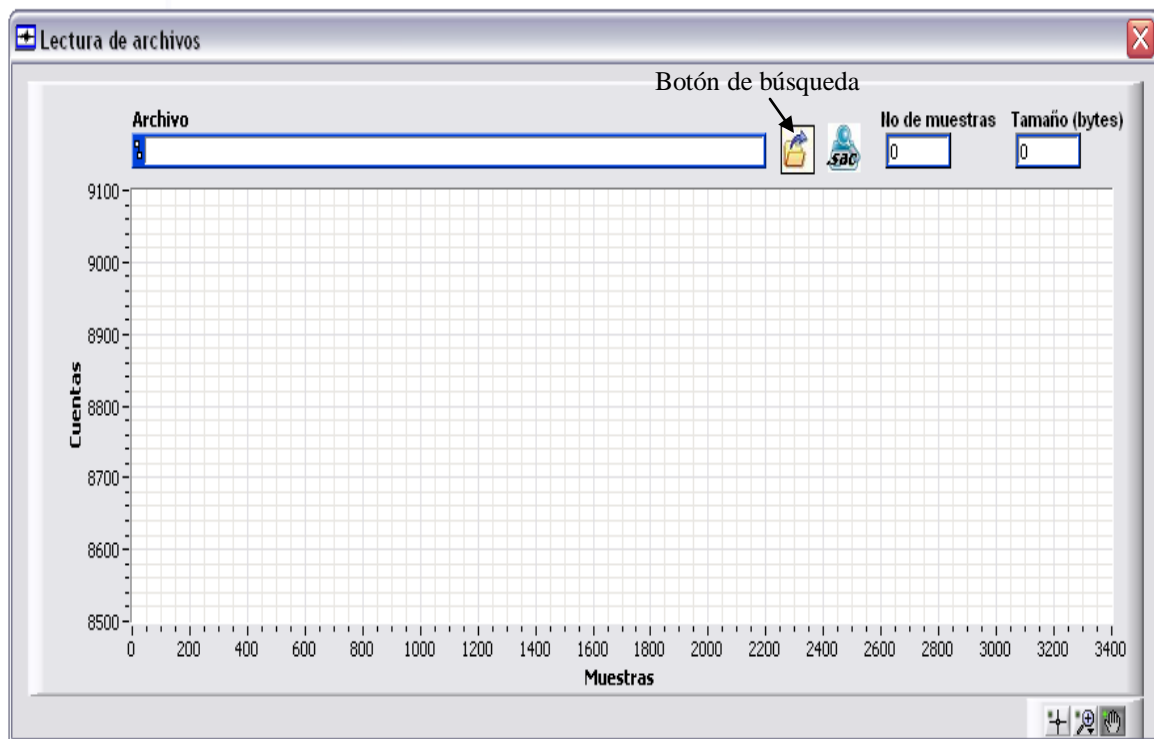


Figura 3.56. Ventana para la lectura de archivos con formato SAC.

En la ventana anterior, el primer paso que debe llevar a cabo el usuario para la lectura es especificar el archivo que se va a leer. Para este fin, se tiene un *Botón de búsqueda* que cuando se presiona despliega un cuadro de diálogo para navegar y seleccionar el archivo que se va a leer. Si el usuario se sabe la ruta del archivo, no se puede escribir en el indicador *Archivo* debido a que éste es un indicador. En el momento en que el usuario especifica el archivo ocurren los siguientes cambios en la ventana *Lectura de archivos* (ver figura 3.57):

- En el indicador *Archivo* se muestra la ruta completa del archivo.
- En la gráfica se presentan los datos contenidos en el archivo.
- En el indicador *No. de muestras* se presenta la cantidad de muestras contenidas en el archivo.
- En el indicador *Tamaño (bytes)* se presenta el tamaño que tiene el archivo en *bytes*.

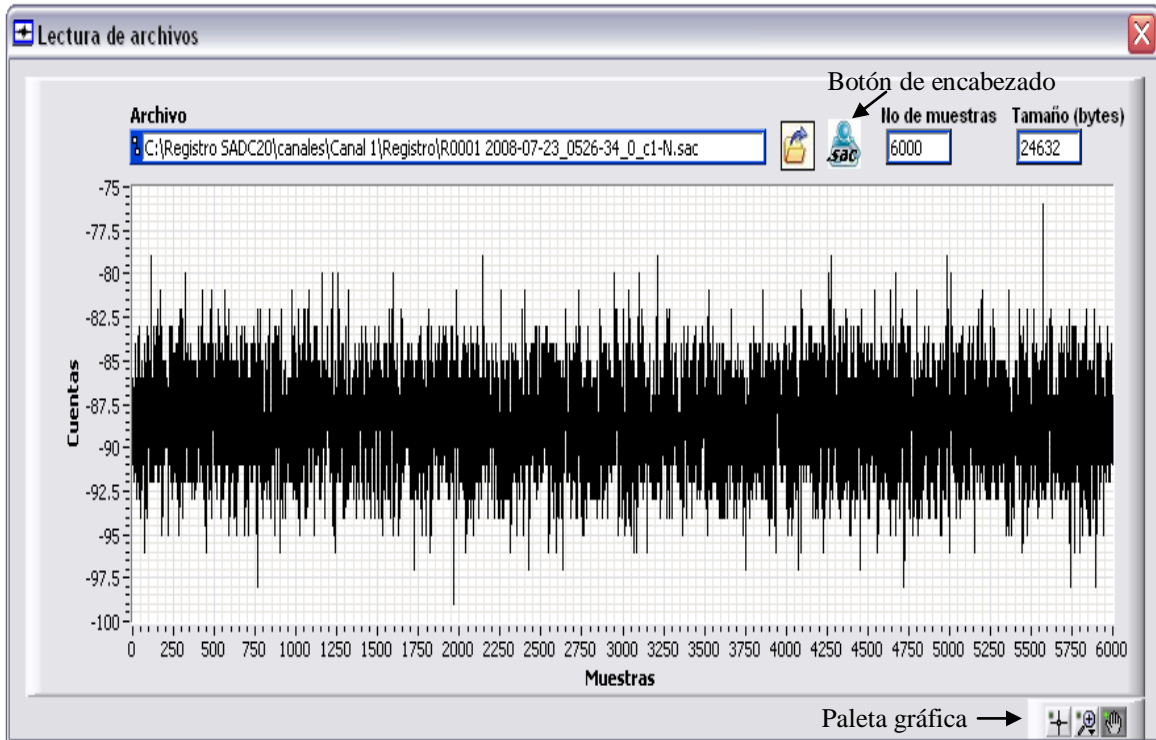


Figura 3.57. Lectura de un archivo con formato SAC.

Una vez que se tiene la gráfica, ésta se puede manipular o se puede ver el contenido del encabezado SAC del archivo.

Para manipular la gráfica se cuenta con una *Paleta gráfica*, mostrada en la figura 3.57, la cual consta de tres botones, ver figura 3.58:



Figura 3.58. Paleta gráfica.

- *Movimiento del cursor:* este botón está situado del lado izquierdo en la *Paleta gráfica*. No se utiliza debido a que no se tienen cursores en la gráfica.
- *Zoom:* este botón está situado en el centro de la *Paleta gráfica* y sirve para realizar acercamientos y alejamientos en la gráfica. Las seis opciones que ofrece este botón son (ver figura 3.59):

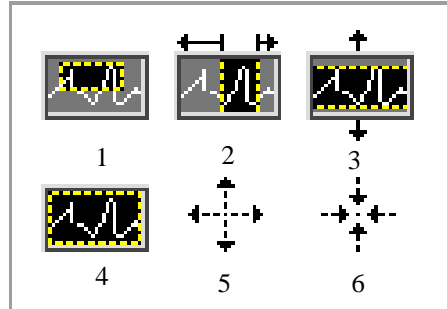


Figura 3.59. Opciones de zoom.

1. Rectángulo: esta opción hace un acercamiento sobre la gráfica tomando como referencia el área de un rectángulo.
 2. Acercamiento x: esta opción hace un acercamiento sobre un área de la gráfica a lo largo del eje x.
 3. Acercamiento y: esta opción hace un acercamiento sobre un área de la gráfica a lo largo del eje y.
 4. Autoajuste: esta opción autoajusta las escalas x-y de la gráfica para ajustarse a los datos.
 5. Acercamiento alrededor de un punto: esta opción hace un acercamiento alrededor de un punto especificado por un *click* sobre la gráfica.
 6. Alejamiento alrededor de un punto: esta opción hace un alejamiento alrededor de un punto especificado por un *click* sobre la gráfica.
- *Arrastre:* este botón está situado del lado izquierdo en la *Paleta gráfica* y sirve para mover el área visible de la gráfica en cualquier dirección.

Para ver el contenido del encabezado SAC del archivo se presiona el *Botón de encabezado* de la ventana *Lectura de archivos* (ver figura 3.57). Con esta acción se desplegará una ventana como la que aparece en la figura 3.60, la cual mostrará los campos del encabezado SAC agrupados en 6 áreas: *Selecciones de fase*, *Campos requeridos y de tiempo*, *Campos de la estación*, *Campos del instrumento*, *Misceláneos* y *Campos del evento*.

Encabezado SAC

A	KA	F	KF	Selecciones de fase	
-12345	-12345	-12345	-12345		
T0	T1	T2	T3	T4	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	
T5	T6	T7	T8	T9	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	
KT0	KT1	KT2	KT3	KT4	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	
KT5	KT6	KT7	KT8	KT9	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	

NPTS	NVHDR	B	Campos requeridos y de tiempo		
6000	6	0			
E	IFTYPE	LEVEN	DELTA	ODELTA	
60	1	1	0.01	-12345	
IDEP	SCALE	DEPMIN	DEPMAX	DEPMEN	
-12345	-12345	-99	-76	-12345	
NZYEAR	NZJDAY	NZHOUR	NZMIN	NZSEC	
2008	2454672	5	26	34	
NZMSEC	IZTYPE	O	KO		
0	-12345	-12345	-12345		

KNETWK	KSTNM	ISTREG	Campos de la estación		
-12345	c1	-12345			
STLA	STLO	STEL	STDP	CMPAZ	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	
CMPINC	KCMPNM	LPSPOL			
-12345	N	-12345			

KINST	IINST	Campos del instrumento			
-12345	-12345				
RESP0	RESP1	RESP2	RESP3	RESP4	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	
RESP5	RESP6	RESP7	RESP8	RESP9	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	

LCALDA	IQUAL	ISYNTH	KDATRD	Misceláneos	
-12345	-12345	-12345	-12345		
USER0	USER1	USER2	USER3	USER4	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	
USER5	USER6	USER7	USER8	USER9	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	
KUSER0	KUSER1	KUSER2	LOVROK	NXSIZE	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	
NYSIZE	XMINIMUM	XMAXIMUM	YMINIMUM	YMAXIMUM	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	

KEVNM	IEVREG	EVLA	Campos del evento		
-12345	-12345	-12345			
EVLO	EVEL	EVDP	MAG	IMAGTYP	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	
IMAGSRC	IEVTYP	NEVID	NORID	NMVID	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	
KHOLE	DIST	AZ	BAZ	GCARC	
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345	

Cerrar

Figura 3.60. Ventana para ver el encabezado de un archivo con formato SAC.

Para realizar las funciones descritas en la ventana *Lectura de archivos*, se tiene un subVI que se llama desde el programa principal. El diagrama de bloques de este subVI consta de un ciclo *while* en donde se tiene una estructura de eventos. Los eventos que se manejan en la estructura son tres y se describen a continuación.

- *Se presionó el Botón de búsqueda:* cuando ocurre este evento aparece un cuadro de diálogo para que el usuario busque el archivo. La ubicación inicial que tendrá este cuadro de diálogo se determina con base en la programación que se presenta en el diagrama de bloques de la figura 3.61. En este diagrama si existe la carpeta de los canales, ésta se utiliza para establecer la ubicación inicial, sino, se establece la última ubicación que se haya utilizado en el cuadro de diálogo.

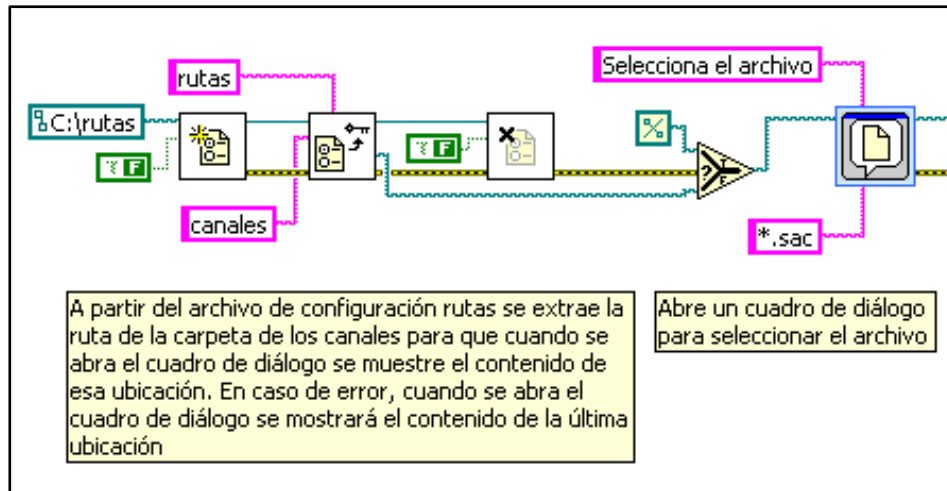


Figura 3.61. Obtención de la ubicación inicial en el cuadro de diálogo.

En cuanto se especifica el archivo que se va a leer, automáticamente se ejecuta el diagrama de bloques de la figura 3.62.

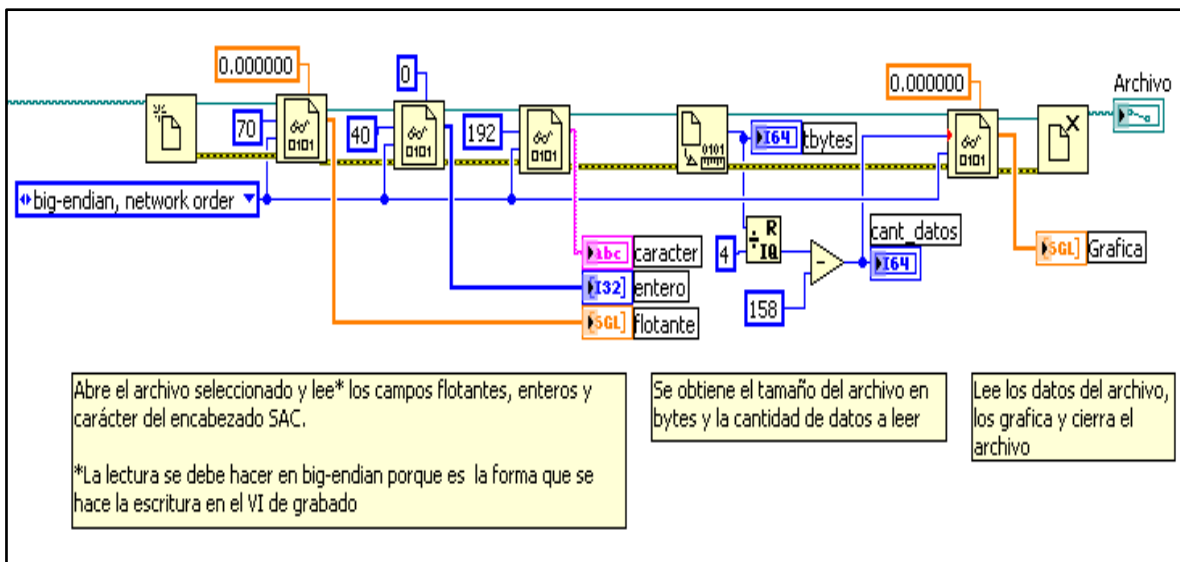


Figura 3.62. Diagrama de bloques para la lectura de un archivo con formato SAC.

En el diagrama de bloques presentado en la figura 3.62, primero se abre el archivo tomando como base la ruta definida en el cuadro de diálogo. A este archivo se le extrae la información del encabezado SAC, para lo cual se leen los 70 campos flotantes, los 40 campos enteros y los 24 campos carácter y se almacenan en arreglos con las etiquetas flotante, entero y carácter, respectivamente. Luego, se obtiene el tamaño en *bytes* del archivo, a partir de este dato se calcula el número de muestras que contiene el archivo y se muestran estos valores en los controles correspondientes de la ventana de lectura. Finalmente, se leen los datos contenidos en el archivo, se ingresan estos datos a la gráfica y se cierra el archivo para mostrar su ruta en el indicador archivo.

En el diagrama de bloques del subVI para mostrar el encabezado SAC se tiene como parámetros de entrada a los valores de los arreglos flotante, entero y carácter pasados a través de variables locales. A estos arreglos se les extrae sus elementos y se presentan en los indicadores que correspondan. Después, se tiene un ciclo *while* con una estructura de eventos para que se cierre la ventana hasta que se presione el botón *Cerrar*.

- *Se presionó el botón Cerrar*: en este evento se detiene el ciclo *while*, se reinician todos los controles a sus valores por *default* e inmediatamente se cierra la ventana *Lectura de archivos*.

El diagrama de bloques para llevar a cabo las funciones de la *Paleta gráfica* no se presentan debido a son opciones que ofrece LabVIEW para manipular las gráficas. En este caso lo único que se hizo fue habilitar la *Paleta gráfica*.

3.3.5. Menú procesamiento

El menú *Procesamiento*, mostrado en la figura 3.64, tiene como objetivo facilitar el procesamiento de los datos utilizando el método SPAC.

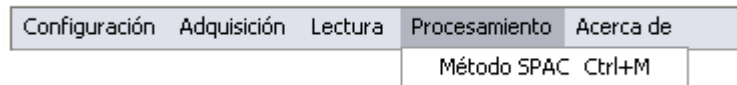


Figura 3.64. Menú Procesamiento.

Cuando se escoge la opción *Método SPAC* del menú *Procesamiento* se manda a llamar a un asistente. Este asistente consta de 8 pasos a través de los cuales el usuario puede evaluar el progreso de la aplicación del método SPAC.

El primer paso del asistente sirve para especificar el tipo de archivo que se procesará, la ruta de los archivos y las constantes por las que se multiplicarán los datos contenidos en los archivos (ver figura 3.65).

Para especificar el tipo de archivo se tiene un control con dos opciones: *Archivo de texto* y *SAC binario*. Un archivo de texto contiene los datos organizados en una columna, por lo que se debe especificar en el control correspondiente la frecuencia de muestreo a la se adquirieron los datos (el valor por *default* es 100 sps). Un archivo SAC binario contiene en su encabezado la frecuencia de muestreo, por lo que no es necesario especificarla.

Para especificar la ruta de cada archivo se tienen tres controles. En estos controles se puede escribir directamente la ruta de cada archivo o se puede utilizar el *botón de búsqueda* para desplegar un cuadro de diálogo, que permite buscar el archivo y colocar su ruta en el control respectivo. Cada archivo contiene el registro de una de las tres estaciones del arreglo triangular, de manera que el archivo 1 contiene el registro de la estación A, el archivo 2 contiene el registro de la estación B y el archivo 3 contiene el registro de la estación C.

Para especificar las constantes por las que se multiplicarán los datos contenidos en los archivos se tienen tres controles. El valor por *default* de estas constantes es 1, pero los valores que éstas pueden tomar dependen de la constante del sensor sísmico utilizado.

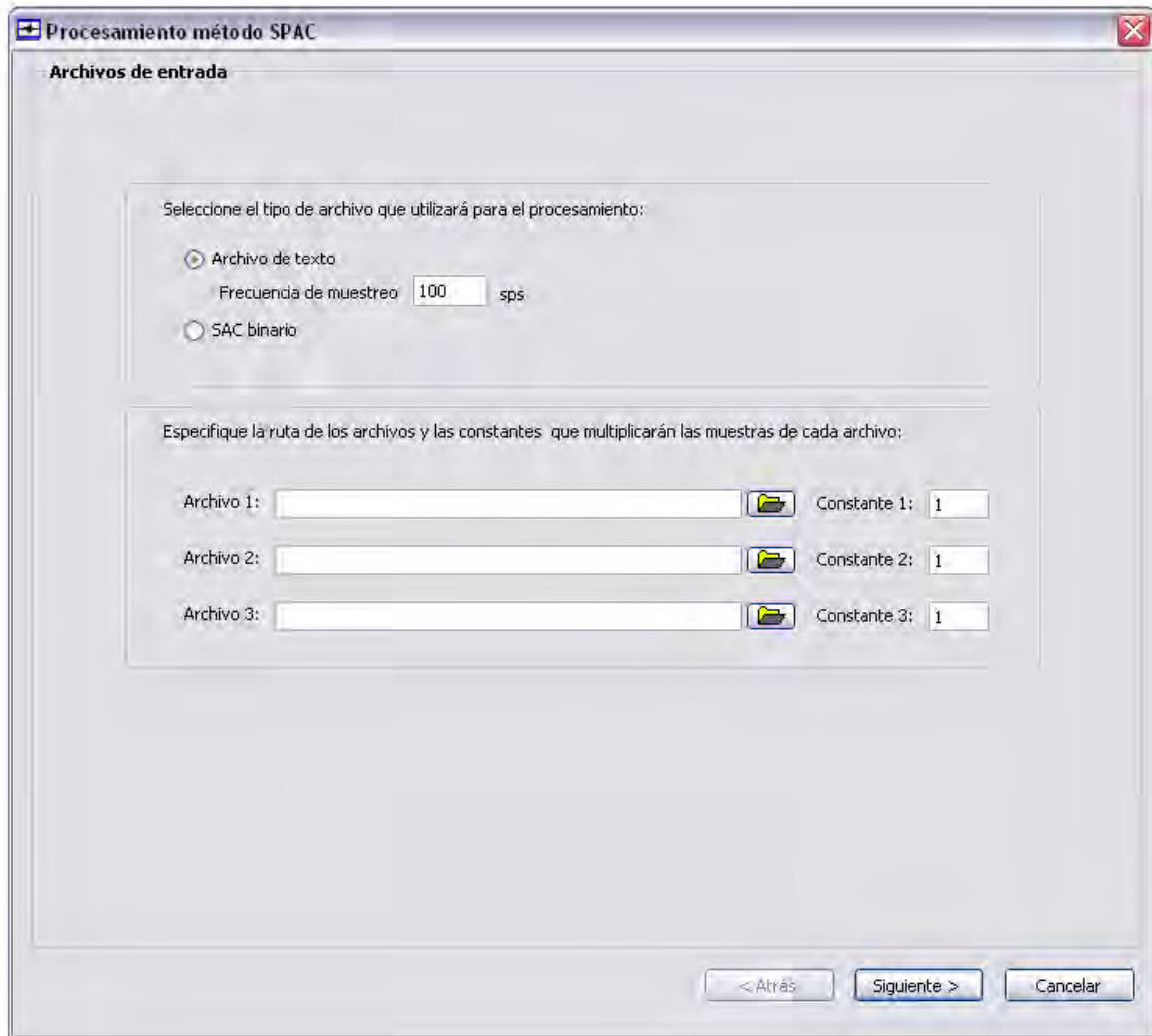


Figura 3.65. Paso 1 del asistente de procesamiento.

Una vez que se han especificado los parámetros del paso 1, se debe presionar el botón *Siguiete*. En caso de que ocurra un error en alguno de los archivos especificados, se avisa en un cuadro de diálogo la causa y se deben corregir los parámetros erróneos. En caso de que no exista algún error, se avanza al paso 2 del asistente. En la transición del paso 1 al paso 2 se realiza la lectura de los archivos de entrada.

El paso 2, mostrado en la figura 3.66, presenta los registros de las tres estaciones en gráficas. En estas gráficas el eje *y* representa la amplitud y el eje *x* el tiempo en segundos. Las escalas de las gráficas se autoajustan para abarcar completamente las señales. Si las gráficas mostradas son satisfactorias, se debe presionar el botón *Siguiete* para avanzar al paso 3, sino, se puede presionar el botón *Atrás* para regresar al paso 1 y realizar modificaciones a los parámetros especificados.

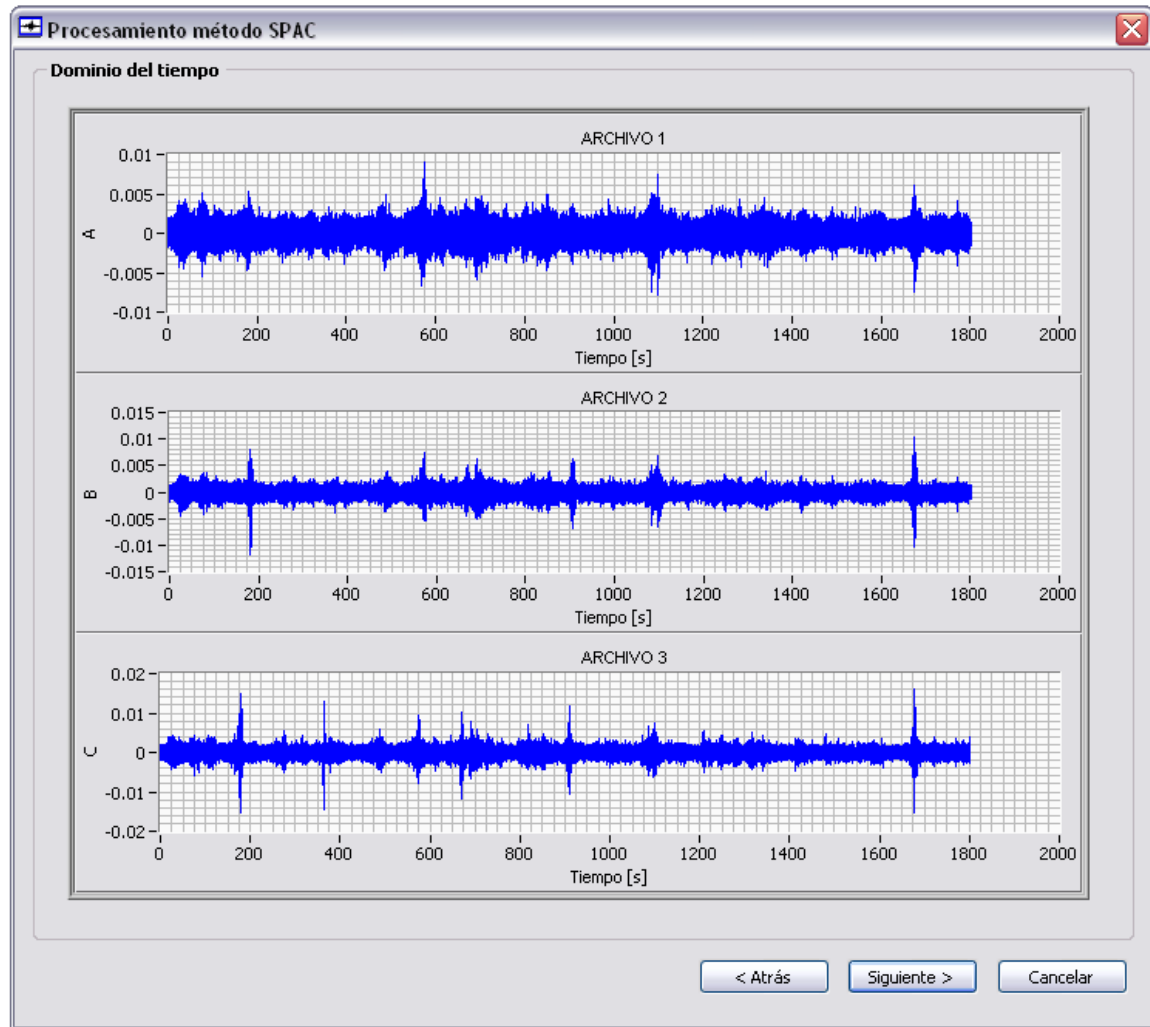


Figura 3.66. Paso 2 del asistente de procesamiento.

El paso 3 del asistente permite establecer algunos parámetros que se utilizarán para aplicar el método SPAC (ver figura 3.67).

Los parámetros que se deben especificar en los controles del paso 3 son:

Longitud de la ventana: este parámetro indica la duración en segundos que tendrá cada una de las n ventanas en las que se dividirá el registro de cada estación. Los valores que se pueden seleccionar en el control son 81.92 segundos (*default*) ó 163.84 segundos. Al momento de seleccionar alguno de estos valores se muestra la cantidad de ventanas en las que se dividirá el registro de cada estación en el indicador *Número de ventanas*.

Traslape: este parámetro indica la forma en la que se dividirá el registro de cada estación. Si la división se hace sin traslape, cada registro se divide de manera que donde termine una ventana comience otra. Si la división se hace con traslape, cada registro se divide de manera que la segunda ventana comience a la mitad de la primer ventana, la tercer ventana

comience a la mitad de la segunda ventana, la cuarta ventana comience a la mitad de la tercer ventana y así sucesivamente. Al momento de cambiar el estado de la casilla de verificación que controla este parámetro se modifica el valor del indicador *Número de ventanas*.

Factor de suavizado: este parámetro indica que tanto se suavizarán las gráficas que se obtendrán en los siguientes pasos del asistente. Los valores que se pueden usar son: 0.03, 0.05, 0.1, 0.5 (*default*), 0.7 y 0.9. El valor más pequeño corresponde a una gráfica con muy poco suavizado y el valor más grande corresponde a una gráfica muy suavizada.

Distancia entre estaciones: este parámetro indica la distancia en metros que hay entre las estaciones que forman el arreglo triangular.

Una vez que se establecen los parámetros que se utilizarán para aplicar el método SPAC se debe presionar el botón *Siguiente*. Si ocurre un error en el paso 3 se notifica al usuario en un cuadro de diálogo, de lo contrario se pasa al paso 4.

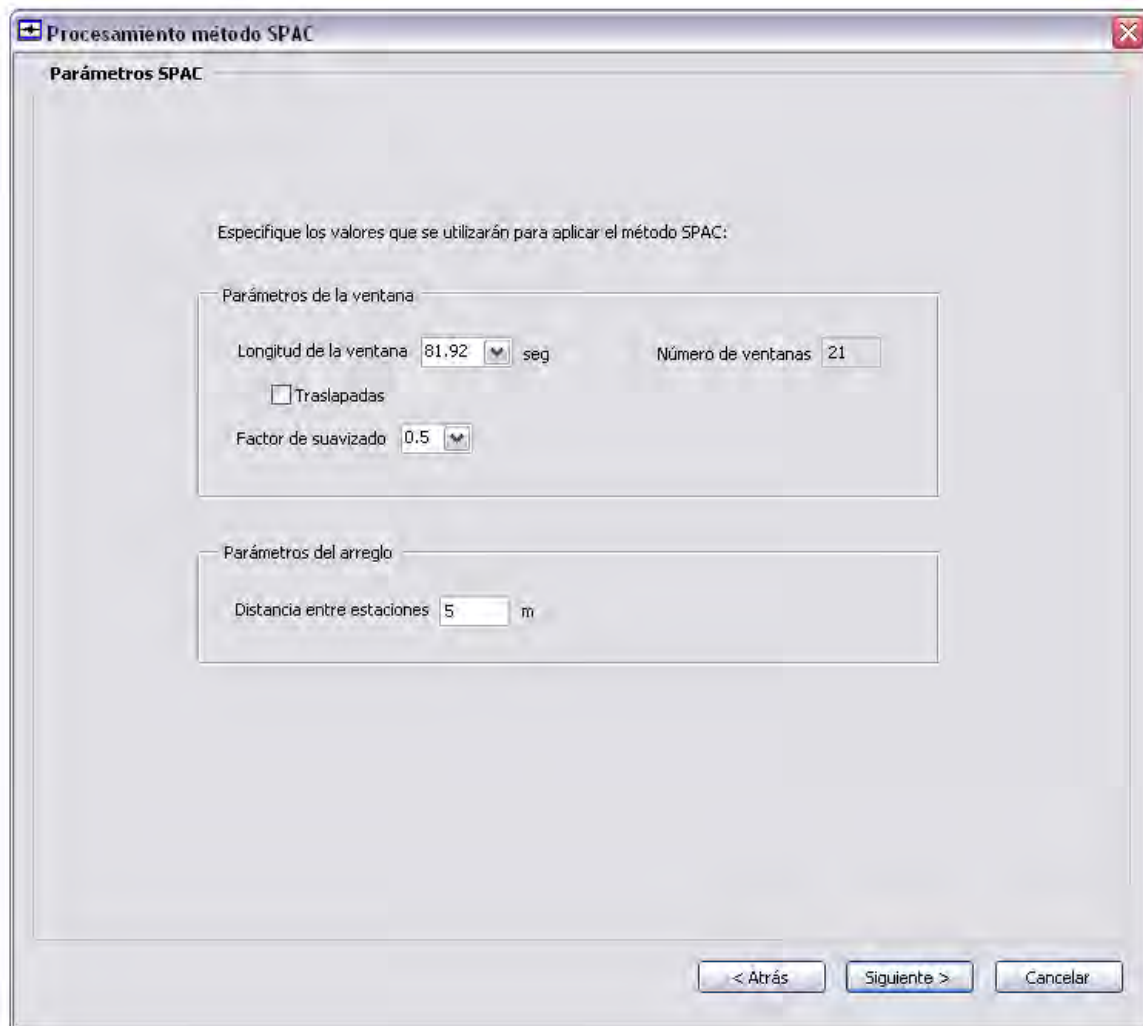


Figura 3.67. Paso 3 del asistente de procesamiento.

En la transición del paso 3 al paso 4 se calculan los espectros de potencia y los coeficientes de autocorrelación de las n ventanas en las que se dividieron los registros de las estaciones.

En el paso 4 se presentan los espectros de potencia en una gráfica (figura 3.68). En esta gráfica los trazos en rojo pertenecen a los espectros de potencia de las n ventanas en las que se dividió el registro de la estación A, los trazos en azul pertenecen a los espectros de potencia de las n ventanas en las que se dividió el registro de la estación B y las líneas verdes pertenecen a los espectros de potencia de las n ventanas en las que se dividió el registro de la estación C.

Si el contenido de la gráfica de los espectros de potencia es satisfactorio, se debe presionar el botón *Siguiente* para avanzar al paso 5, sino, se puede regresar al paso 3 para corregir algunos parámetros que puedan mejorar el resultado.

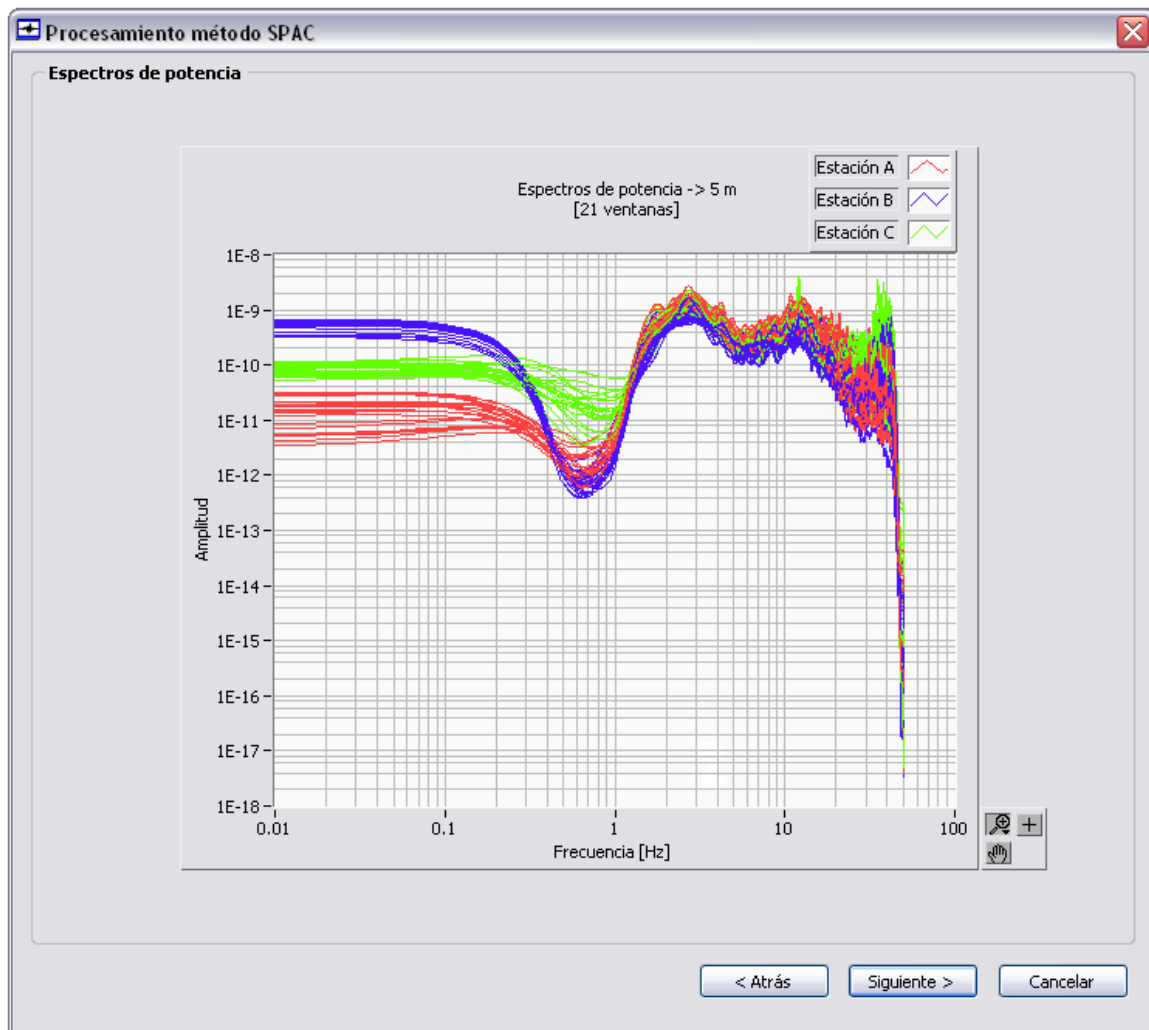


Figura 3.68. Paso 4 del asistente de procesamiento.

El paso 5, mostrado en la figura 3.69, presenta en un arreglo de gráficas los coeficientes de autocorrelación de las n ventanas en las que se dividieron los registros de las estaciones. Cada una de estas gráficas representa una ventana en la que el trazo en rojo corresponde al coeficiente de autocorrelación tomando como centro a la estación A, el trazo en azul corresponde al coeficiente de autocorrelación tomando como centro a la estación B y el trazo en verde corresponde al coeficiente de autocorrelación tomando como centro a la estación C. Para poder observar todas las gráficas del arreglo de gráficas se cuenta con una barra de desplazamiento vertical.

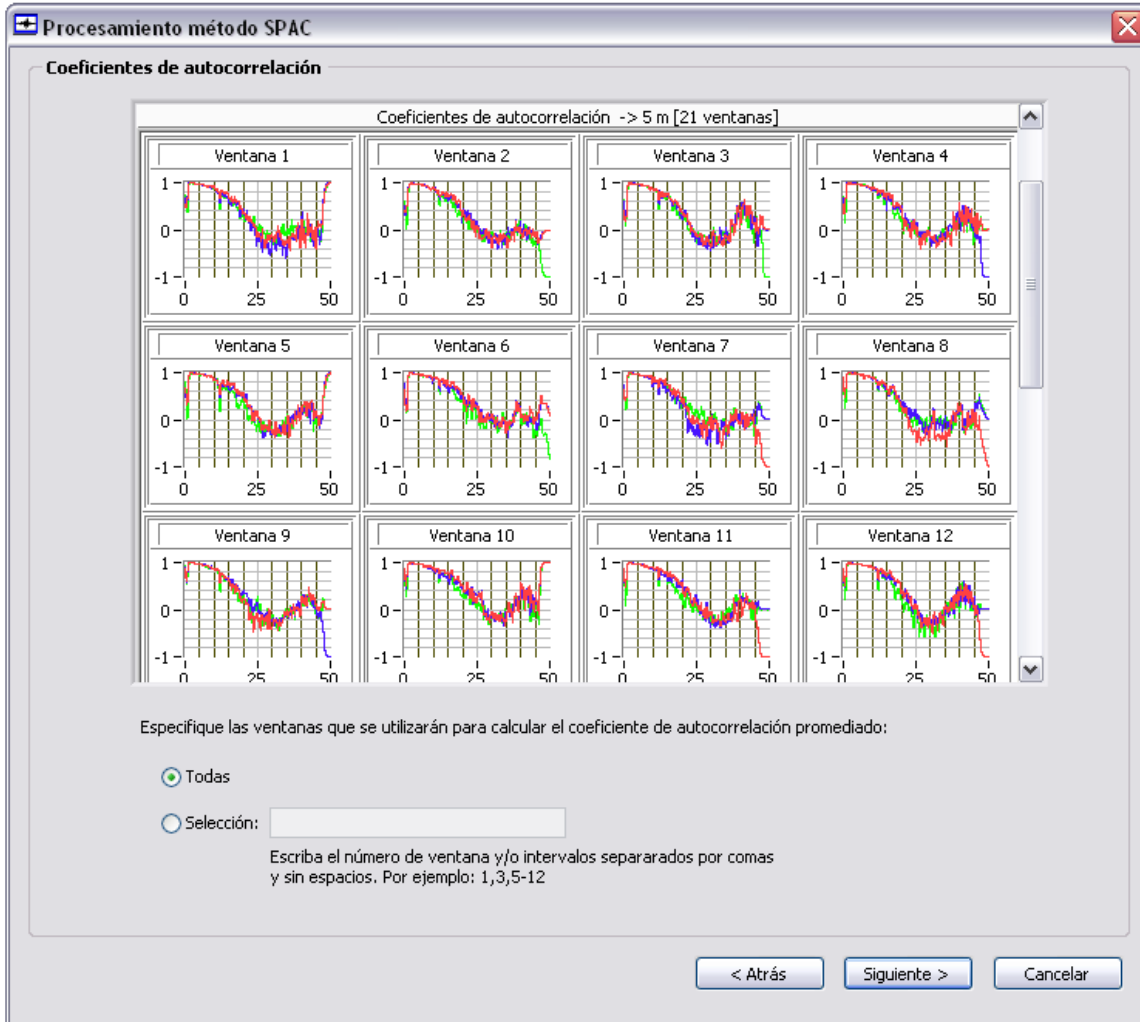


Figura 3.69. Paso 5 del asistente de procesamiento.

Del análisis del contenido del arreglo de gráficas se debe especificar las ventanas que se utilizarán para el cálculo del coeficiente de autocorrelación promediado. Para ello se tiene un control con las opciones *Todas* y *Selección*. En la opción *Todas* se tomará el total de las ventanas para cálculo. En la opción *Selección* se habilita un control para escribir el número y/o el rango de las ventanas que se tomarán para el cálculo.

Una vez que se han especificado los valores de los controles del paso 5, se debe presionar el botón *Siguiente* para avanzar al paso 6. En la transición del paso 5 al 6 se hace el cálculo del coeficiente de autocorrelación promediado para las ventanas especificadas.

En el paso 6 se muestra la gráfica del coeficiente de autocorrelación promediado (figura 3.70). Dependiendo de lo observado en la gráfica por un especialista en ingeniería sísmica, se puede avanzar al paso 7 o se puede regresar al paso 5 para especificar otras ventanas y obtener un resultado diferente.

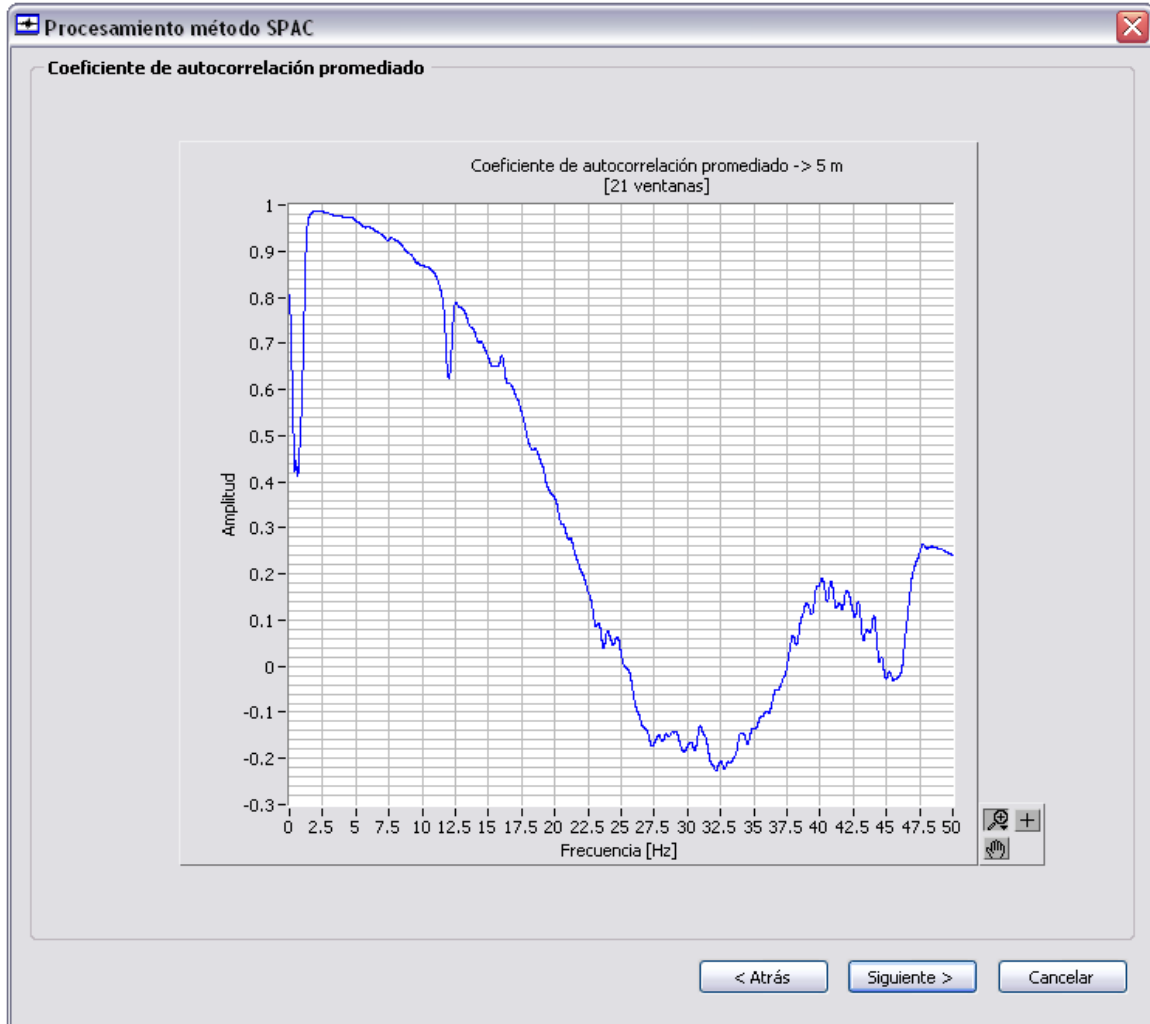


Figura 3.70. Paso 6 del asistente de procesamiento.

En la transición del paso 6 al paso 7 se efectúa el cálculo de la curva de dispersión a partir de los datos del coeficiente de autocorrelación promediado.

En el paso 7 se presenta la gráfica de la curva de dispersión (ver figura 3.71). En esta gráfica también se presentan los límites empíricos superior e inferior definidos por Miyakoshi. Dependiendo de lo observado en la gráfica por un especialista en ingeniería

sísmica, se puede avanzar al paso 8 o regresar para modificar algunos parámetros en los pasos anteriores que permitan mejorar el resultado.

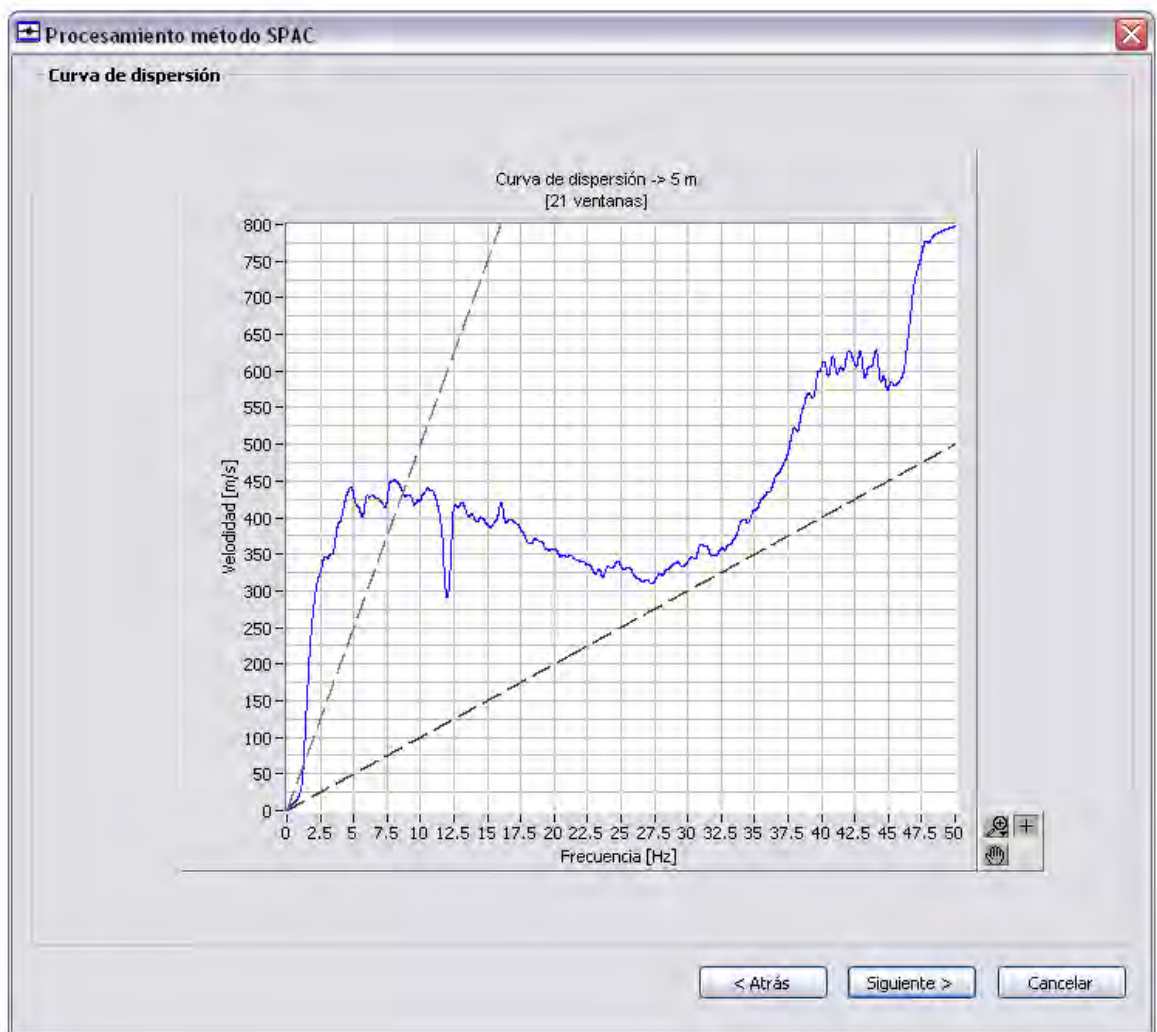


Figura 3.71. Paso 7 del asistente de procesamiento.

El paso 8 ofrece la opción de guardar en archivos *jpeg* todas las gráficas obtenidas en los pasos del asistente y guardar los datos de la curva de dispersión en un archivo de texto (ver figura 3.72). Para ello, se debe marcar una casilla de verificación para habilitar dos controles. En el primer control se debe escribir el nombre de la carpeta en donde se pondrán los archivos. En el segundo control se debe especificar la ruta en donde se creará dicha carpeta. Para crear la carpeta y los archivos se debe presionar el botón *Finalizar*. También al presionar el botón *Finalizar* se cerrará el asistente o se volverá a comenzar, dependiendo del estado de la casilla de verificación *Finalizar y comenzar otra vez el asistente*.

En los pasos 4, 6 y 7 del asistente se encuentra una *Paleta gráfica* en la parte inferior izquierda de las gráficas. Esta *Paleta gráfica* realiza las mismas funciones descritas en la gráfica de la ventana *Lectura de archivos*.

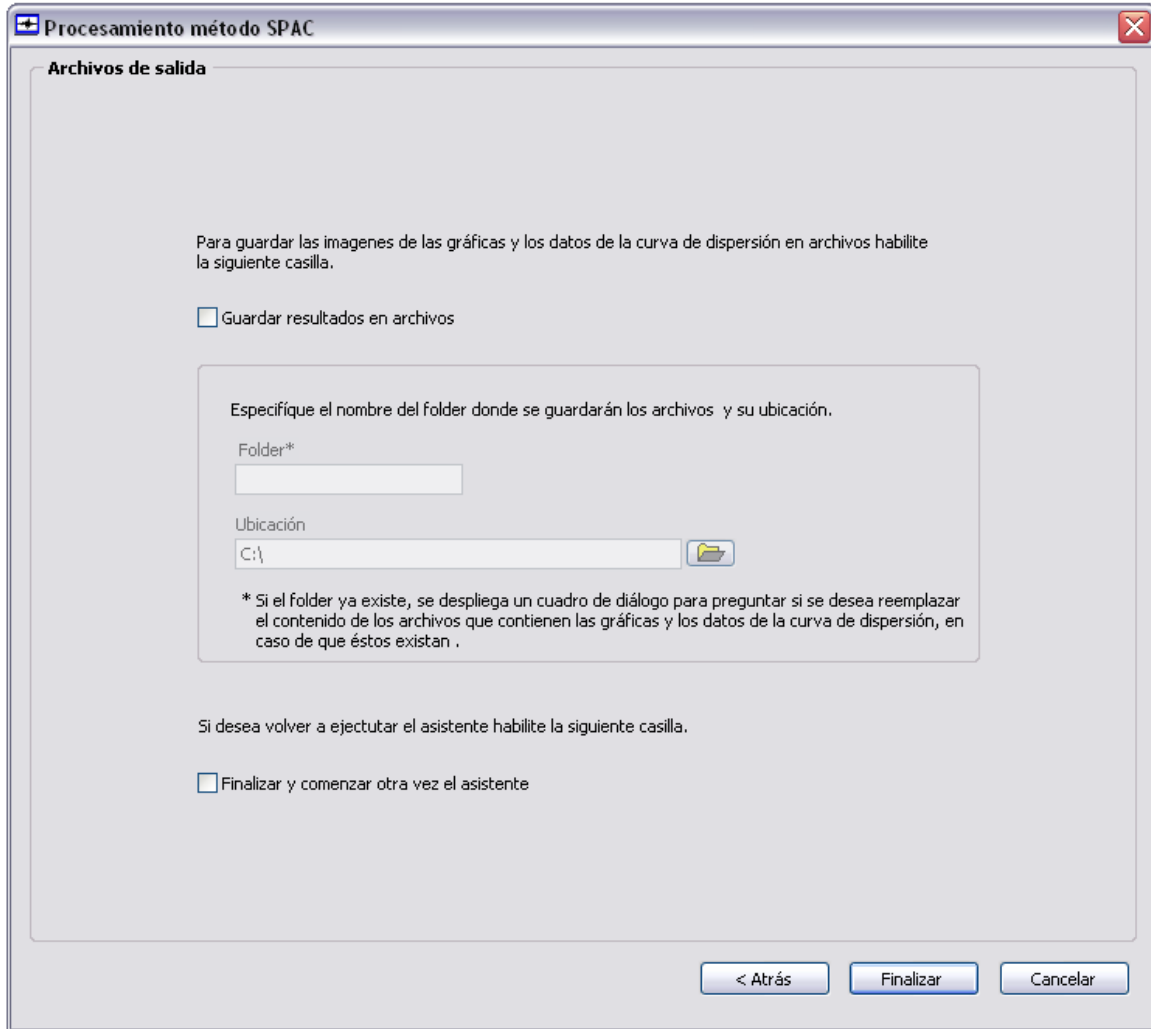


Figura 3.72. Paso 8 del asistente de procesamiento.

Antes de comentar el diagrama de bloques del asistente de procesamiento, se explicará brevemente la idea general que se utilizó para su desarrollo.

La parte esencial en la programación de un asistente es mostrar y ocultar un grupo de controles e indicadores. Para realizar esta función en LabVIEW se tiene un tipo de control denominado *tab control* (figura 3.73). Un *tab control* está formado por varias pantallas denominadas páginas, en las cuales se colocan los controles e indicadores que tendrá cada paso del asistente.

El paso de una página a otra se controla mediante dos botones que están siempre visibles. El primer botón es el botón *Siguiente*, el cual da la orden de mostrar la página siguiente y de ejecutar el código que corresponda entre cada transición, de manera que se reflejen los cambios en los controles e indicadores de la página siguiente. El segundo botón es el botón *Atrás*, el cual da la orden de mostrar la página anterior.

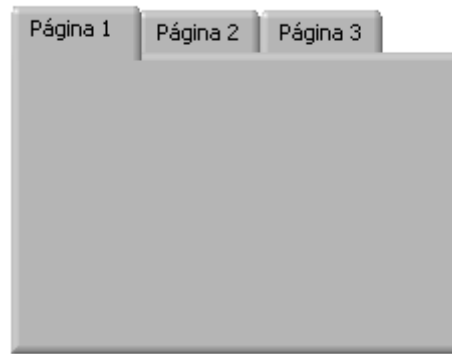


Figura 3.73. Tab control.

Dicho lo anterior, se procederá a la explicación del diagrama de bloques del asistente de procesamiento desarrollado.

El diagrama de bloques del asistente de procesamiento se divide en dos secciones.

Sección 1

La sección 1 del diagrama de bloques del asistente de procesamiento se encarga de llevar a cabo la inicialización del asistente. Este diagrama realiza las siguientes acciones (ver figura 3.74):

- Se inicializa el valor del *tab control* para que se muestre la primer página. El asistente de procesamiento desarrollado tiene 8 pasos, cada uno de los cuales corresponde a una página de un *tab control*. Cada página del *tab control* del asistente de procesamiento tiene un nombre y un número. Los nombres y los números de las páginas del *tab control* son: Archivos de entrada (0), Dominio del tiempo (1), Parámetros SPAC (2), Espectros de potencia (3), Coeficientes de autocorrelación (4), Coeficiente de autocorrelación promediado (5), Curva de dispersión (6) y Archivos de salida (7). El *tab control* contiene un valor que indica el nombre y el número de la página que se está mostrando actualmente. Este valor se puede modificar programáticamente con el nodo de propiedad *value (signaling)* para forzar a que se muestre una página. De aquí que, para mostrar la primer página se modifica el valor del *tab control* a Archivos de entrada (0).
- Se crea una cola para el control de las páginas. Esta cola será utilizada como un registro para almacenar el nombre de las páginas en donde se ha estado.
- Se establece la posición del panel frontal en el origen. Cada vez que se edita el panel frontal del asistente de procesamiento suele moverse el área visible. Estableciendo la posición del panel frontal en el origen se evita tener que recentrar manualmente el panel frontal cada vez que éste se edita.
- Se reinician todos los controles e indicadores a su valor por *default*, se habilita el control *Frecuencia de muestreo* de la página *Archivos de entrada*, se deshabilita el

control *Selección* de la página *Coefficientes de autocorrelación* y se deshabilitan los controles *Ubicación* y *Folder* de la página *Archivos de salida*. Esto se hace para que cuando se avance a una página por primera vez, se muestren los valores predeterminados de los controles e indicadores.

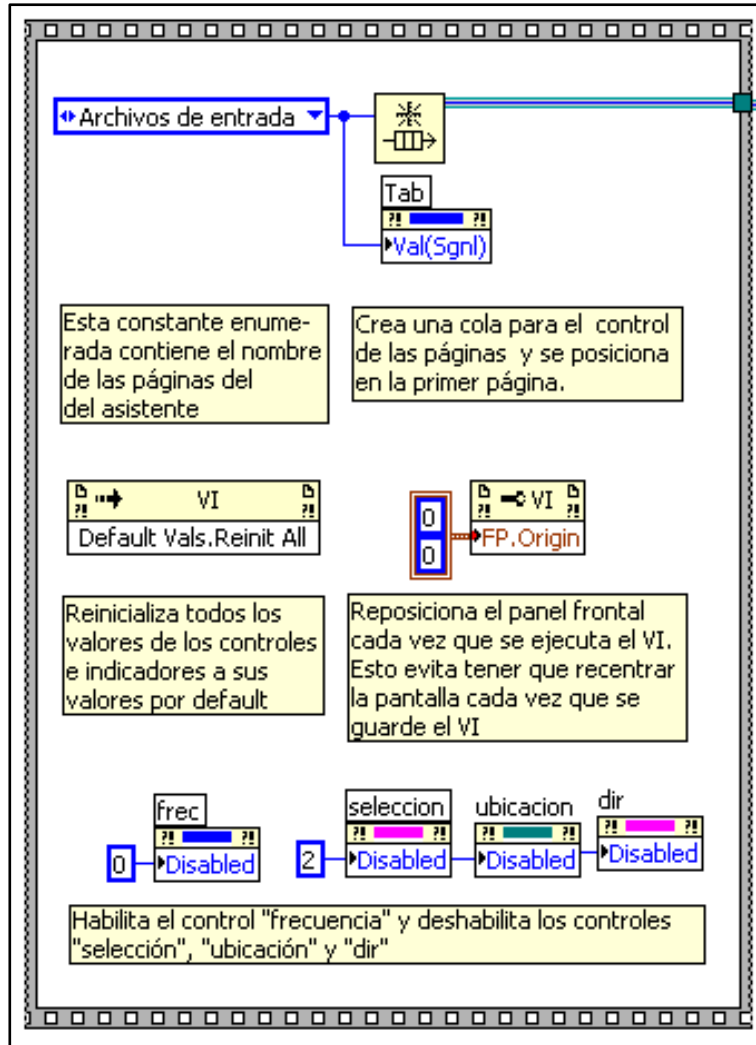


Figura 3.74. Inicialización del asistente.

Sección 2

La sección 2 del diagrama de bloques del asistente de procesamiento se encarga de ejecutar todas las funciones que se realizan a lo largo del asistente. Para realizar esto se utiliza un ciclo *while*, manejado por una estructura de ocho eventos. Los eventos que se manejan son los siguientes:

1. Se presionó el botón *Cancelar* o el botón *Cerrar* de la barra de título. En este evento se genera un valor verdadero que detiene el ciclo *while* y cierra el asistente de procesamiento.

2. Se modificó el valor del *tab control*. Este evento se dispara después de que se inicializa el asistente o después de que se hace una transición de página utilizando los botones *Siguiente* o *Atrás*. El diagrama de bloques de este evento se muestra en la figura 3.75.

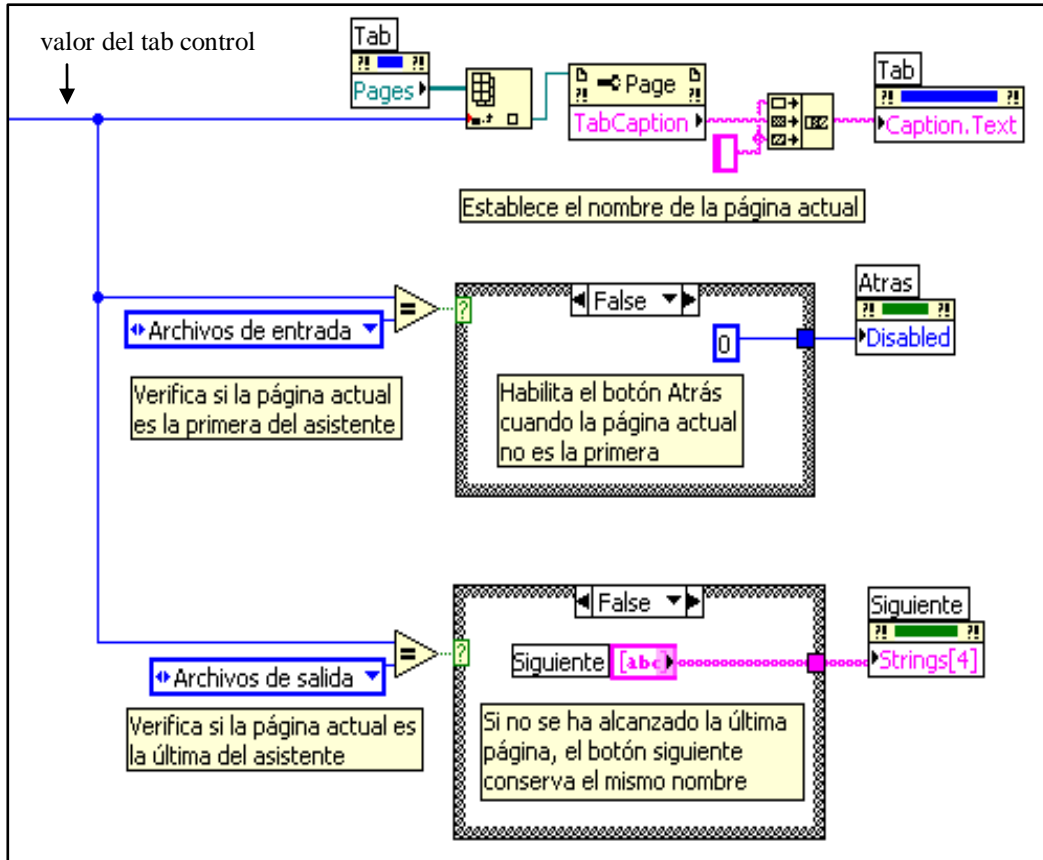


Figura 3.75. Actualización de la leyenda de la página y de los botones *Siguiente* y *Atrás*.

El diagrama de bloques mostrado en la figura 3.75 está compuesto por tres bloques.

En el primer bloque, a partir de valor del *tab control*, se toma el nombre de la página para actualizar la leyenda que aparece en la parte superior de cada página. Esto hace para que la leyenda coincida con la página que se está mostrando. Cuando se inicializa el asistente se modifica el valor del *tab control* a Archivos de entrada (0), por lo que en este caso se toma el nombre “Archivos de entrada” para actualizar la leyenda. Cuando se presiona el botón *Siguiente* o el botón *Atrás* se modifica el valor del *tab control* para mostrar una página determinada, por lo que en este caso se toma el nombre de esta página para actualizar la leyenda.

En el segundo bloque se actualiza el estado del botón *Atrás*. Para ello se toma el valor del *tab control* para verificar si la página actual es la primera del asistente. Si la página actual es la primera del asistente, se deshabilita y se pone en gris el botón *Atrás*, de lo contrario, se habilita el botón *Atrás*.

En el tercer bloque se actualiza el nombre del botón *Siguiente*. Para ello se toma el valor del *tab control* para verificar si la página actual es la última del asistente. Si la página actual es la última del asistente, se cambia el nombre del botón *Siguiente* por *Finalizar*, de lo contrario, se conserva el mismo nombre.

3. *Se presionó el botón Siguiente*. Este evento es el más importante del asistente, debido a que aquí se actualizan los controles e indicadores antes de mostrar la página siguiente. Después de esta actualización se habilita la página siguiente para mostrarla. El diagrama de bloques de este evento se presenta en la figura 3.76.

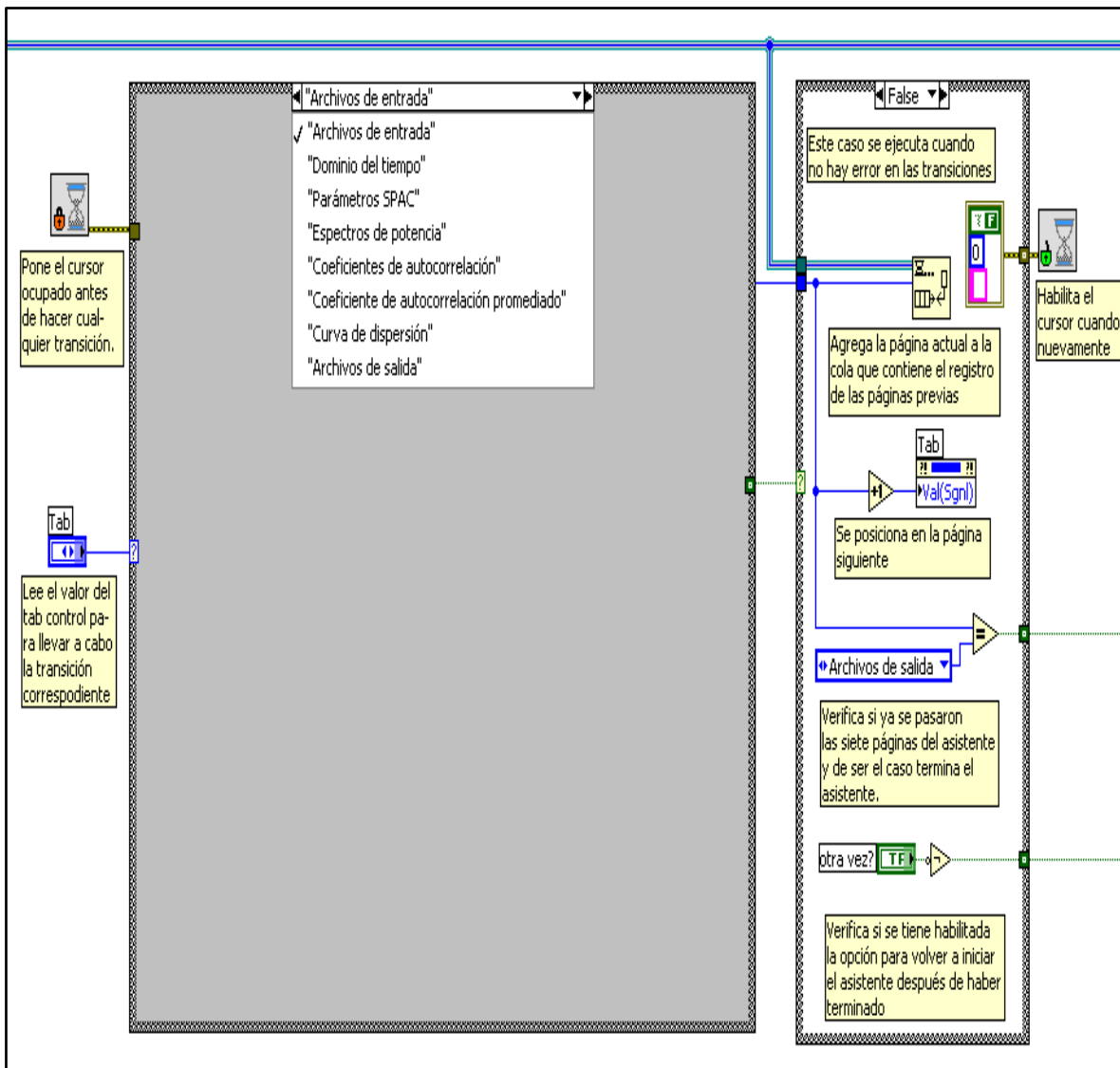


Figura 3.76. Transición a la página siguiente.

La primera acción que se realiza en el diagrama de bloques de la figura 3.76 es obtener el valor del *tab control*. Dependiendo de este valor se ejecuta el código de uno de los 8 casos de una estructura *case*. Los casos de la estructura *case* son:

- “Archivos de entrada”. En este caso se ejecuta el código para la transición de la página *Archivos de entrada* a la página *Dominio del tiempo*.
- “Dominio del tiempo”. En este caso se ejecuta el código para la transición de la página *Dominio del tiempo* a la página *Espectros de potencia*.
- “Parámetros SPAC”. En este caso se ejecuta el código para la transición de la página *Parámetros SPAC* a la página *Espectros de potencia*.
- “Espectros de potencia”. En este caso se ejecuta el código para la transición de la página *Espectros de potencia* a la página *Coefficientes de autocorrelación*.
- “Coefficientes de autocorrelación”. En este caso se ejecuta el código para la transición de la página *Coefficientes de autocorrelación* a la página *Coefficiente de autocorrelación promediado*.
- “Coefficiente de autocorrelación promediado”. En este caso se ejecuta el código para la transición de la página *Coefficiente de autocorrelación promediado* a la página *Curva de dispersión*.
- “Curva de dispersión”. En este caso se ejecuta el código para la transición de la página *Curva de dispersión* a la página *Archivos de salida*.
- “Archivos de salida”. En este caso se ejecuta el código para finalizar el asistente de procesamiento y en su caso, guardar los resultados del procesamiento.

Cada uno de los casos mencionados devuelve un valor lógico para indicar si ocurrió un error en la ejecución de sus códigos. Este valor lógico se ingresa a una estructura *case*, en la cual en caso de que el valor lógico sea verdadero (ocurrió un error en la transición) se muestra un cuadro de diálogo para indicar la causa del error y no se muestra la página siguiente. En caso de que el valor lógico sea falso (no ocurrió un error en la transición) se realizan las siguientes acciones (ver parte derecha de la figura 3.75):

- Se almacena en la cola el nombre de la página que se está abandonando, para que se pueda regresar a ella en caso de que después se presione el botón *Atrás*.
- Se incrementa en uno el valor del *tab control* para mostrar la página siguiente. Este valor se modifica utilizando el nodo de propiedad *value (signaling)*.
- Se verifica si la página actual es la última del asistente. En caso de que esta página sea la última se devuelve un valor verdadero para detener el ciclo *while* de esta sección.
- Se verifica el valor del control *Finalizar y comenzar otra vez* de la página *Archivos de salida*. Como ya se mencionó, el diagrama de bloques del asistente de procesamiento consta de dos secciones. La sección 1 es la parte de

inicialización del asistente y la sección 2 es un ciclo *while* con una estructura de eventos para realizar todas las funciones a lo largo del asistente. Estas dos secciones llevan a cabo la ejecución completa del asistente una sola vez. Debido a que en ocasiones es necesario ejecutar más veces el asistente, las secciones 1 y 2 se colocaron dentro de un ciclo *while*, donde cada iteración corresponde a una ejecución completa del asistente. Este último ciclo *while* se controla mediante el control *Finalizar y comenzar otra vez*. De aquí que, si el valor del control *Finalizar y comenzar otra vez* es falso, se detiene el ciclo *while* y se cierra el asistente, de lo contrario se inicia de nuevo el asistente.

4. *Se presionó el botón Atrás*. Este evento muestra la página anterior. Para realizar esto se utiliza el diagrama de bloques de la figura 3.77. En este diagrama lo que se hace es leer el primer valor de la cola para obtener el nombre de la página anterior y utilizando este nombre se modifica el valor del *tab control* para mostrar la página anterior.

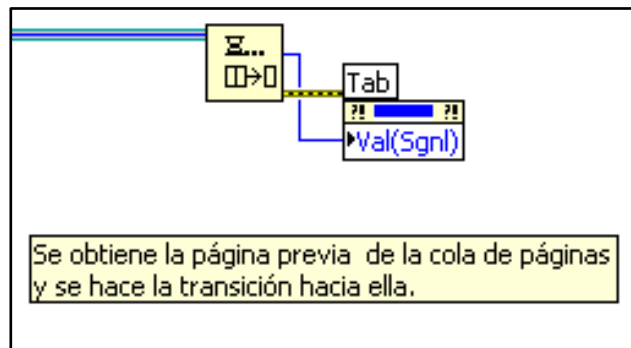


Figura 3.77. Transición a la página anterior.

5. *Se modificó el valor del control para especificar el tipo de archivo en la página Archivos de entrada*. En este evento se habilita el control *Frecuencia de muestreo* si el tipo de archivo es archivo de texto, de lo contrario, este control se deshabilita.
6. *Se modificó el valor del control para especificar si se usarán todas o una selección de ventanas en la página coeficientes de autocorrelación*. En este evento se habilita el control para especificar el número y/o el rango de las ventanas si se va a especificar una selección, de lo contrario, este control se deshabilita.
7. *Se modificó el valor del control Guardar resultados en archivos en la página Archivos de salida*. En este evento si el valor de control *Guardar resultados en archivos* es verdadero, se habilita el control *Folder* y el control *Ubicación* de la página *Archivos de salida*, de lo contrario, estos controles se deshabilitan.
8. *Se modificó el valor del control Traslape en la página Parámetros SPAC*. En este evento se modifica el valor del indicador *Número de ventanas* cuando se cambia el estado del control *Traslape*.

Como ya se observó, cuando se presiona el botón *Siguiente*, primero se actualiza el estado de los controles e indicadores antes de que se muestre la página siguiente. Estas actualizaciones se realizan mediante el código que se ejecuta en cada transición de página. En los siguientes apartados se explicará el código que se ejecuta en cada una de estas transiciones.

Transición de la página Archivos de entrada a la página Dominio del tiempo

En esta transición se utilizan los parámetros especificados en los controles de la página *Archivos de entrada*, para leer los tres archivos de entrada y graficar sus datos en la gráfica de la página *Dominio del tiempo*. El diagrama de bloques que realiza esta función es el de la figura 3.78.

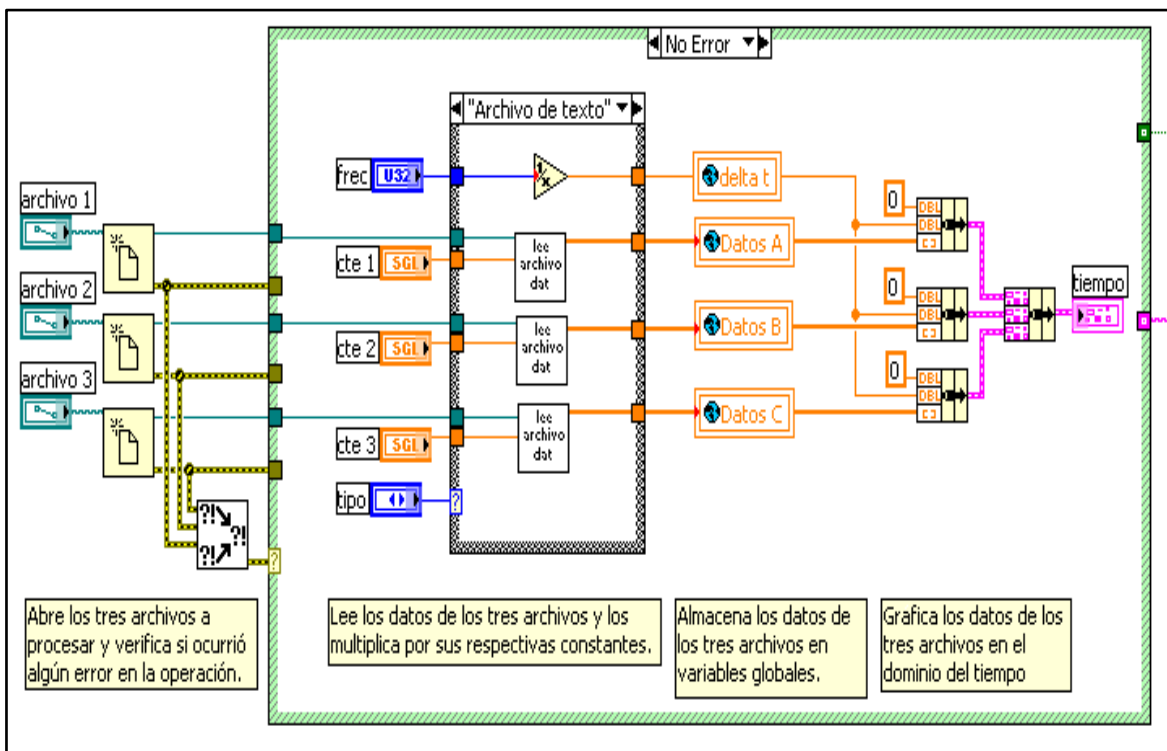


Figura 3.78. Transición de la página Archivos de entrada a la página Dominio del tiempo.

La manera en que funciona el diagrama de bloques de la figura 3.78 es la siguiente:

En principio se abren los archivos especificados en los controles *Archivo 1*, *Archivo 2* y *Archivo 3*. Después de hacer la apertura de los archivos, se verifica si ocurrió un error. Si ocurrió un error se verifica cual de los archivos lo provocó y se crea un mensaje para avisar la causa en un cuadro de diálogo, pero si no hubo error, se verifica el tipo de archivo que se leerá en el control *Tipo de archivo*. Para la lectura, si el tipo de archivo especificado es archivo de texto se utiliza un subVI llamado “lee archivo dat”, pero si el tipo de archivo especificado es un archivo SAC binario, se utiliza un subVI llamado “lee archivo sac”. Estos subVIs tienen como entrada la referencia del archivo y la constante por la que se multiplicarán sus datos y tiene como salida un arreglo con los datos del archivo; en el caso

del subVI “lee archivo SAC” también se devuelve el delta de tiempo. En un archivo de texto el delta de tiempo se determina mediante el recíproco de la frecuencia de muestreo especificada. Una vez obtenidos los datos contenidos en los tres archivos y el delta de tiempo, éstos se almacenan en las variables globales *datos A*, *datos B*, *datos C* y *delta t*, respectivamente. Para graficar los datos de un archivo, incluyendo la información de tiempo, se forma un *cluster* con tres elementos, donde el primer elemento es el tiempo de inicio (0), el segundo elemento es la distancia entre puntos (delta t) y el tercer elemento es el arreglo de datos del archivo. De aquí que, para graficar los datos de los tres archivos se forman tres *clusters*, los cuales después se agrupan en un solo *cluster* para mostrar las tres gráficas en un solo indicador llamado tiempo. Este indicador es el que aparece en la página *Dominio del tiempo*.

El diagrama de bloques del subVI “lee archivos dat” se muestra en la figura 3.79. Como se observa en esta figura, primero se leen los datos contenidos en el archivo. Estos datos están en forma de texto y dispuestos en una columna, por lo que se aplica un proceso de conversión para obtener los datos organizados en una arreglo de flotantes de precisión simple. Este arreglo de flotantes se multiplica por la constante que se haya especificado y se devuelve el resultado en un indicador llamado datos.

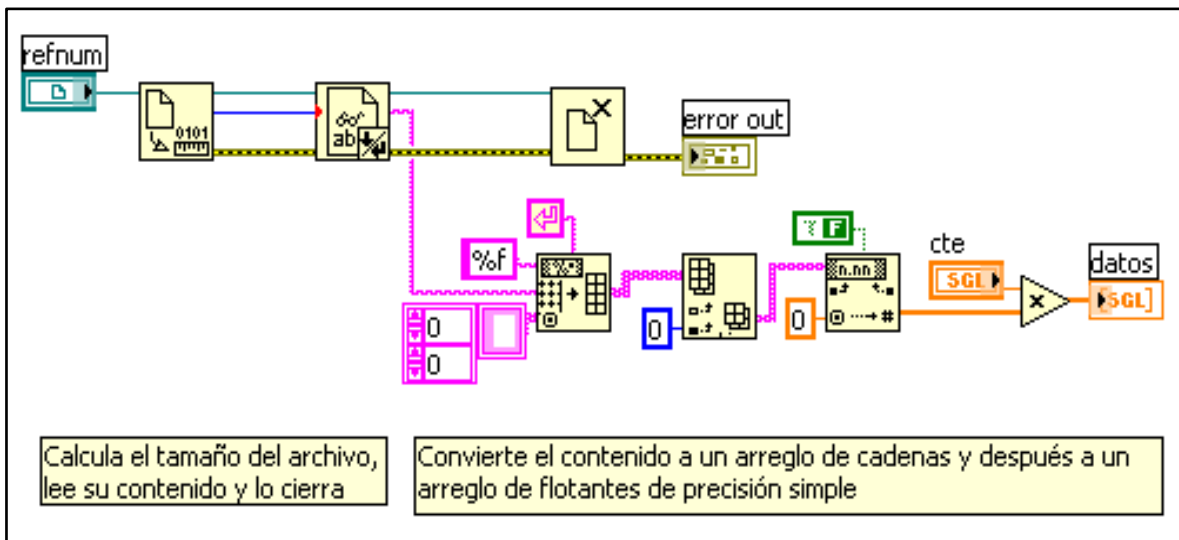


Figura 3.79. SubVI “lee archivo dat”.

El diagrama de bloques del subVI “lee archivo sac” se muestra en la figura 3.80. En este subVI primero se lee el delta de tiempo del encabezado SAC. Después se calcula la cantidad de datos que se van a leer a partir del tamaño del archivo y se leen los datos. Estos datos se multiplican por la constante que se haya especificado y se devuelve el resultado en un indicador llamado datos.

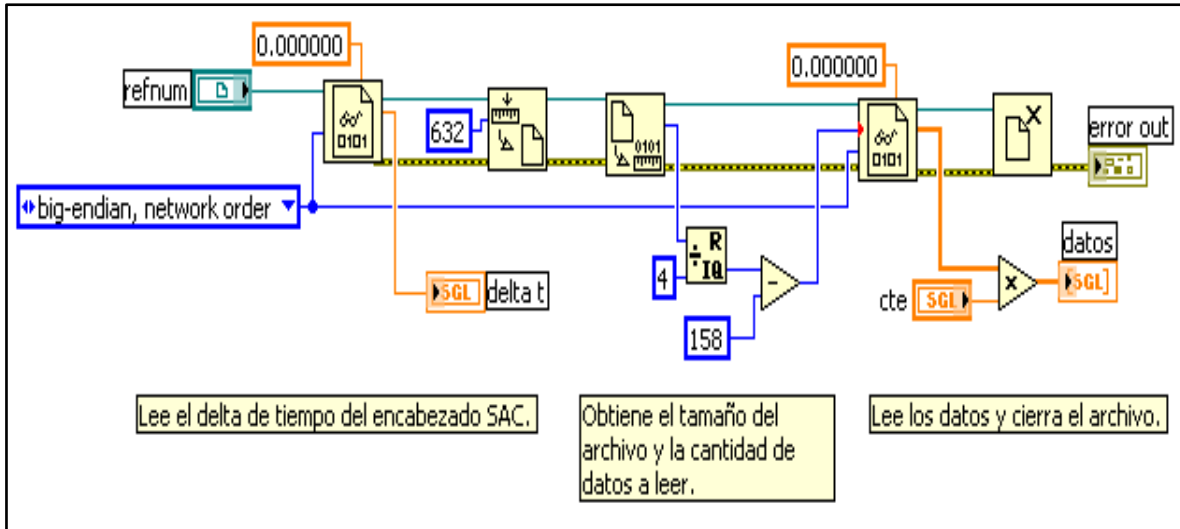


Figura 3.80. SubVI “lee archivo sac”.

Transición de la página Dominio del tiempo a la página Parámetros SPAC

En esta transición se calcula el número de ventanas que aparecerá en el indicador *Número de ventanas* de la página *Parámetros SPAC*. Para llevar a cabo esto se ejecuta el diagrama de bloques de la figura 3.81. En este diagrama se obtiene el número de datos contenidos en las variables globales *datos A*, *datos B* y *datos C*. Este número de datos se multiplica por *delta t* para determinar la duración del archivo en segundos. Para calcular el número de ventanas se divide la duración del archivo en segundos entre la duración de la ventana en segundos (longitud de la ventana). Este número de ventanas se conserva si no se va a utilizar traslape, pero si se utiliza traslape este número de ventanas se duplica y se le sustrae una unidad.

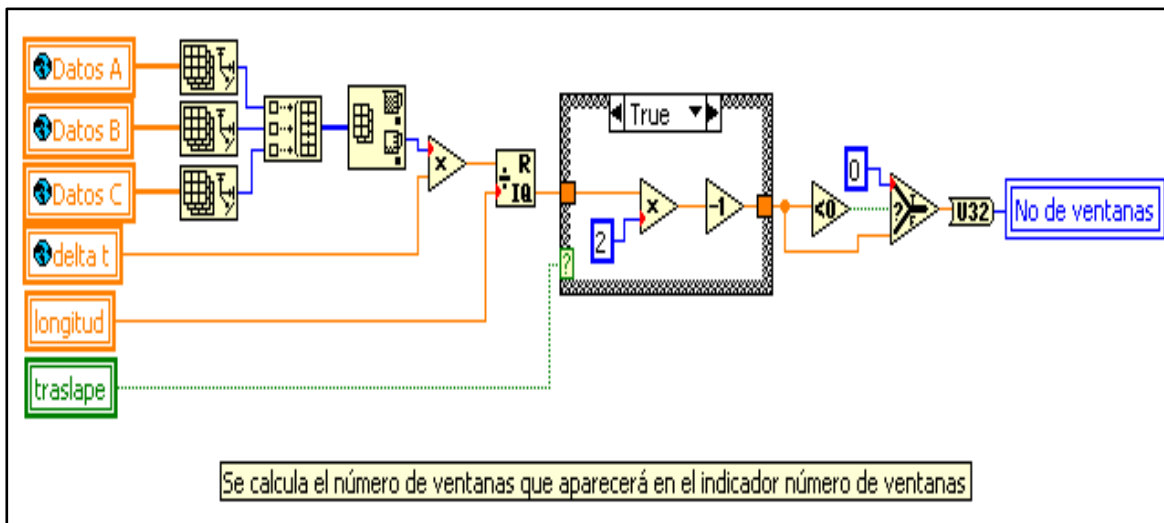


Figura 3.81. Transición de la página Dominio del tiempo a la página Parámetros SPAC.

Transición de la página Parámetros SPAC a la página Espectros de potencia

Cuando se establecen los parámetros que se utilizarán para aplicar el método SPAC, en la página *Parámetros SPAC*, y se presiona el botón *Siguiente*, se lleva a cabo la transición de la página *Parámetros SPAC* a la página *Espectros de potencia*. El diagrama de bloques que realiza esta transición se muestra en la figura 3.82 y su funcionamiento es como sigue:

Primero se verifica que el valor del indicador *Número de ventanas* de la página *Espectros de potencia* sea mayor que cero. Si el número de ventanas es mayor que cero, se efectúa el cálculo de los espectros de potencia, de los espectros de potencia cruzados y de los coeficientes de autocorrelación para el número de ventanas especificado, utilizando para ello un subVI llamado “esp & coefs”, y se presenta el resultado del cálculo de los espectros de potencia en la gráfica de la página *Espectros de potencia*. Además, se actualiza el título de las gráfica de las página *Espectros de potencia*, esto con la intención de que en el título de las gráfica se presente el número de ventanas en las que dividieron los registros y la distancia entre estaciones especificada. Si el número de ventanas es menor que cero, no se realiza la transición y se despliega un cuadro de diálogo para informar al usuario que se debe tener al menos una ventana para el cálculo.

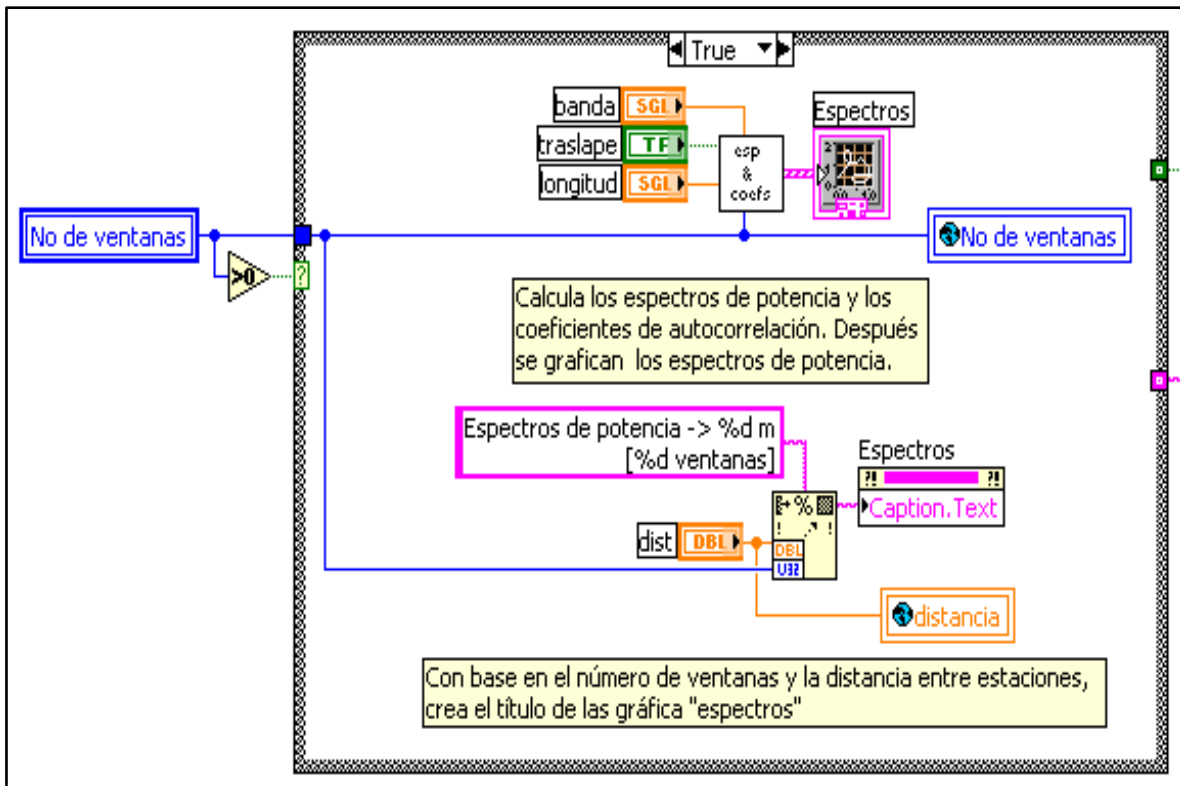


Figura 3.82. Transición de la página *Parámetros SPAC* a la página *Espectros de potencia*.

El diagrama de bloques del subVI “esp & coefs” se presenta en la figura 3.83.

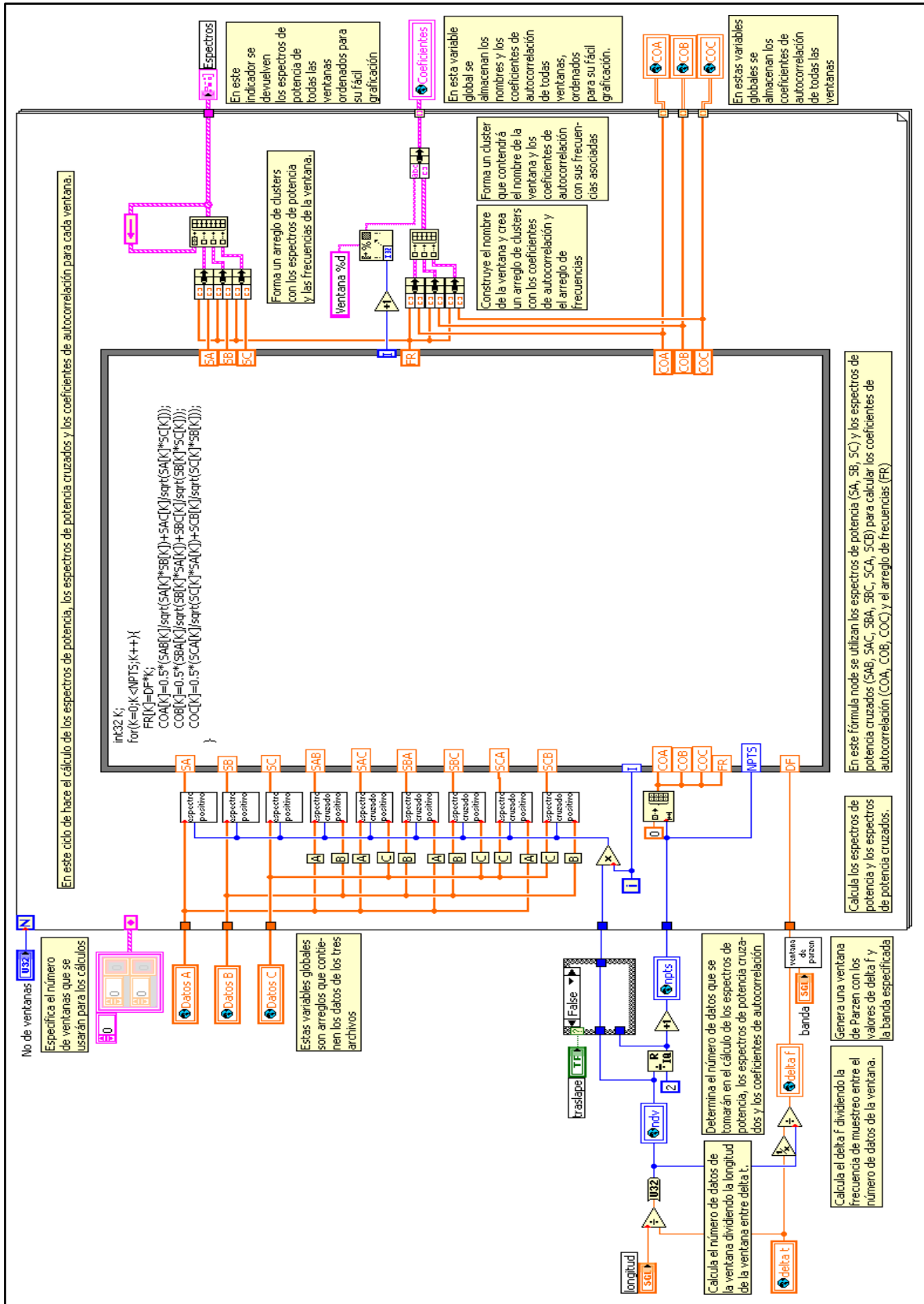


Figura 3.83. Cálculo de los espectros de potencia y los coeficientes de autocorrelación.

El subVI “esp & coefs” tiene como entrada los valores especificados en los controles *Número de ventanas*, *Traslape*, *Longitud de la Ventana* y *Factor de Suavizado* de la página *Parámetros SPAC*. También se toman como valores de entrada los datos pasados a través de las variables globales *datos A*, *datos B*, *datos C* y *delta t*. Para explicar mejor el diagrama de bloques de este subVI se puede dividir en dos secciones.

La sección 1 del subVI “esp & coefs” es todo lo que está antes del ciclo *for*. En esta sección se determinan cuatro variables que son muy importantes para el cálculo de los espectros de potencia, de los espectros de potencia cruzados y de los coeficientes de autocorrelación para las ventanas especificadas. Estas variables son las siguientes:

Número de datos en la ventana: es el número de datos que se considerarán como una ventana. Este número se determina dividiendo la longitud de la ventana entre delta t. Así por ejemplo, si la frecuencia de muestreo es 100 Hz, el valor de delta t es 0.01 segundos (1/100), de aquí que si se especificó una longitud de ventana de 81.92 segundos, el número de datos en la ventana es $81.92 / 0.01 = 8192$. En el diagrama de bloques este valor se almacena en la variable global *ndv*.

Delta f: es el espacio de frecuencia que habrá entre los datos que resulten de los cálculos en el dominio de la frecuencia para cada ventana. Este valor se determina dividiendo la frecuencia de muestreo entre el número de datos en la ventana. Así por ejemplo, si la frecuencia de muestreo es 100 Hz y el número de datos en la ventana es 8192, entonces delta f es $100 \text{ Hz} / 8192 = 0.012207 \text{ Hz}$. En el diagrama de bloques este valor se almacena en la variable global *delta f*.

Número de puntos: es el número de datos que se tomarán de los espectros de potencia, de los espectros de potencia cruzados y de los coeficientes de autocorrelación. Este valor se determina dividiendo el número de datos en la ventana entre dos y después sumándole uno. Así por ejemplo, si el número de datos en la ventana es 8192, entonces el número de puntos es $(8192/2) + 1 = 4097$. En el diagrama de bloques este valor se almacena en la variable global *npts*.

Constante de inicio de la ventana: este valor depende de si las ventanas serán con traslape o sin traslape. Si las ventanas son con traslape la constante de inicio de la ventana es igual al número de datos en la ventana entre dos, de lo contrario el inicio de la ventana es igual al número de datos. Así por ejemplo, si el número de datos en la ventana es 8192, se tendría una constante de inicio de la ventana de 4096 con traslape y de 8192 sin traslape.

En la sección 1 también se genera una ventana de Parzen utilizando un subVI llamado “ventana de Parzen”, el cual tiene como parámetros de entrada delta f y el factor de suavizado (banda). La ventana de Parzen generada servirá para más adelante hacer el suavizado de los espectros de potencia y de los espectros de potencia cruzados.

La sección 2 está constituida por todo el código que está dentro del ciclo *for*. El número de iteraciones de este ciclo *for* se controla mediante el número de ventanas que se haya especificado. En cada iteración del ciclo *for* se realizan las siguientes acciones sobre los datos de una ventana:

En primer lugar se toma una porción de datos de las variables globales *datos A*, *datos B* y *datos C*. El tamaño de la porción de datos que se tomará es igual al número de datos en la ventana. Con las tres porciones de datos tomadas se calculan los espectros de potencia SA, SB y SC, utilizando para ello el subVI “espectro positivo”. También con las tres porciones de datos extraídas se calculan los espectros de potencia cruzados SAB, SAC, SBA, SBC, SCA y SCB, utilizando para ello el subVI “espectro cruzado positivo”. Los espectros de potencia y los espectros de potencia cruzados se ingresan a una función llamada *formula node*, en la cual se implementó, mediante código escrito en lenguaje C, las ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10 para el cálculo de los coeficientes de autocorrelación COA, COB y COC. Dentro del *formula node* también se genera un arreglo de frecuencias tomando como base delta f, el cual servirá para el graficado de los espectros de potencia contra frecuencia y los coeficientes de autocorrelación contra frecuencia. A la salida del *formula node* se efectúan tres tareas. La primer tarea es la organización en un arreglo de *clusters* de los datos de los espectros de potencia (SA, SB y SC) y el arreglo de frecuencias, para que al término del ciclo *for* se pueda obtener una gráfica como la que se presenta en la página *Espectros de potencia*. La segunda tarea es la organización en un *cluster* del número de la ventana, los datos de los coeficientes de autocorrelación (COA, COB, COC) y el arreglo de frecuencias. Este *cluster* se agrega a un arreglo de *clusters*, de manera que al término del ciclo *for* cada elemento del arreglo de *clusters* contenga los tres coeficientes de autocorrelación dispuestos para su fácil graficado. La tercer tarea es agregar los coeficientes de autocorrelación COA, COB y COC a tres arreglos bidimensionales (uno por cada coeficiente de autocorrelación) de manera que constituyan un renglón de los arreglos bidimensionales. Al término del ciclo *for* cada renglón de los arreglos bidimensionales contendrá los coeficientes de autocorrelación de todas las ventanas.

Al finalizar la ejecución el ciclo *for*, se devuelve en el indicador espectros el arreglo de *clusters* que contiene los espectros de potencia para su fácil graficado. También, se almacena en la variable global *coeficientes* el arreglo de *clusters* que contiene los coeficientes de autocorrelación de todas las ventanas, dispuestos para su fácil graficado. Por último, se almacenan los arreglos bidimensionales que contienen los coeficientes de autocorrelación de todas las ventanas en las variables globales *COA*, *COB* y *COC*.

Una vez concluida la explicación del subVI “esp & coefs” se procederá a dar una breve descripción del funcionamiento de los subVIs que fueron mencionados en dicha explicación. Esto subVIs son “espectro positivo”, “espectro cruzado positivo” y “ventana de Parzen”.

El diagrama de bloques del subVI “espectro positivo” se presenta en la figura 3.84. En este diagrama primero se toma de un registro de datos una porción de datos con una longitud igual al número de datos en la ventana, para calcular el espectro de potencia. La función *Power Spectrum* de LabVIEW que realiza el cálculo del espectro de potencia utiliza la ecuación 2.6. Debido a que el espectro de potencia de una señal es simétrico alrededor de DC, la información obtenida con la función *Power Spectrum* contiene el espectro de potencia para frecuencias positivas y frecuencias negativas, de manera que la mitad de la energía está concentrada en las frecuencias positivas y la otra mitad está concentrada en las frecuencias negativas. Como en la mayoría de aplicaciones, en el área sísmica sólo se trabaja con la parte positiva del espectro de potencia, también llamado

espectro de potencia de un lado, pero teniendo en cuenta que éste debe conservar todo el contenido de energía del espectro de potencia completo, también llamado espectro de potencia de dos lados. Considerando lo anterior, en el diagrama de bloques se convierte el espectro de potencia de dos lados a uno de un lado, descartando el espectro de potencia para frecuencias negativas y multiplicando el espectro de potencia para frecuencias positivas por dos, excepto la componente de DC y la componente de Nyquist. En la última parte del diagrama de bloques se toma el espectro de potencia de un lado para someterlo a un algoritmo que suaviza los datos con una ventana de Parzen. El algoritmo de suavizado está implementado en un subVI llamado “suaviza ventana Parzen”.

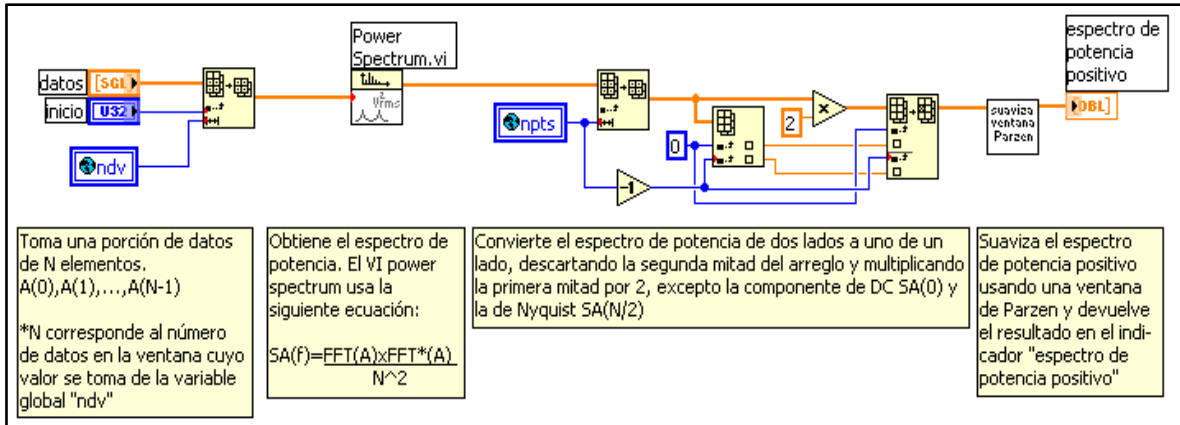


Figura 3.84. Cálculo del espectro de potencia.

El subVI “espectro cruzado positivo” tiene un diagrama de bloques como el de la figura 3.85. En este diagrama se toma de dos registros una porción de datos de longitud igual al número de datos en la ventana. Con estas dos porciones de datos se calcula el espectro de potencia cruzado con la función de LabVIEW llamada *Cross Power*, la cual utiliza la ecuación 2.7. Después, con la información del espectro de potencia cruzado se obtiene un espectro de potencia cruzado de un lado, de la misma manera en que se hizo para el espectro de potencia. A este espectro de potencia cruzado de un lado se le extrae su parte real y se suaviza utilizando el subVI “suaviza ventana Parzen”.

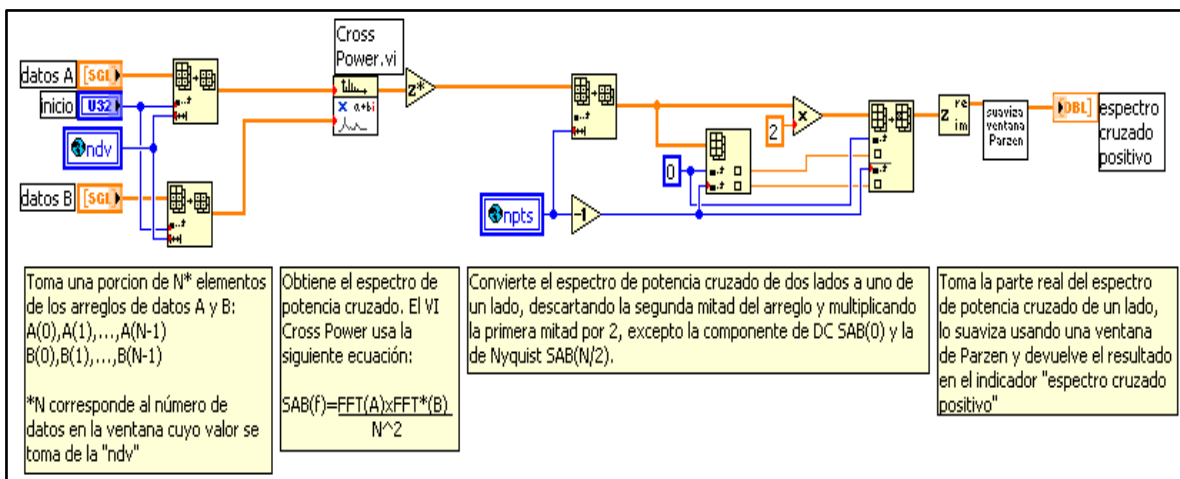


Figura 3.85. Cálculo de la parte real del espectro de potencia cruzado.

Antes de explicar los subVIS “ventana de Parzen” y “suavizado ventana de Parzen”, se dará una introducción a lo que es una ventana de Parzen y el proceso que se realiza con ésta para el suavizado de los datos.

Una ventana de Parzen está definida por la siguiente ecuación:

$$w(f) = \frac{3}{4}u \left[\sin\left(\frac{\pi uf}{2}\right) / \frac{\pi uf}{2} \right]^4 \quad (3.3)$$

donde f es la frecuencia y u es una constante que está relacionada con la banda b de la ventana de Parzen, por la siguiente expresión:

$$b = \frac{280}{151u} = \frac{1.854305}{u} \quad (3.4)$$

En la figura 3.86 se muestra una ventana de Parzen. Para crear una ventana de Parzen como la mostrada se debe especificar el valor de la banda en Hz y evaluar las ecuaciones 3.3 y 3.4. Entre más pequeño sea el valor de la banda especificada, más estrecha será la ventana de Parzen.

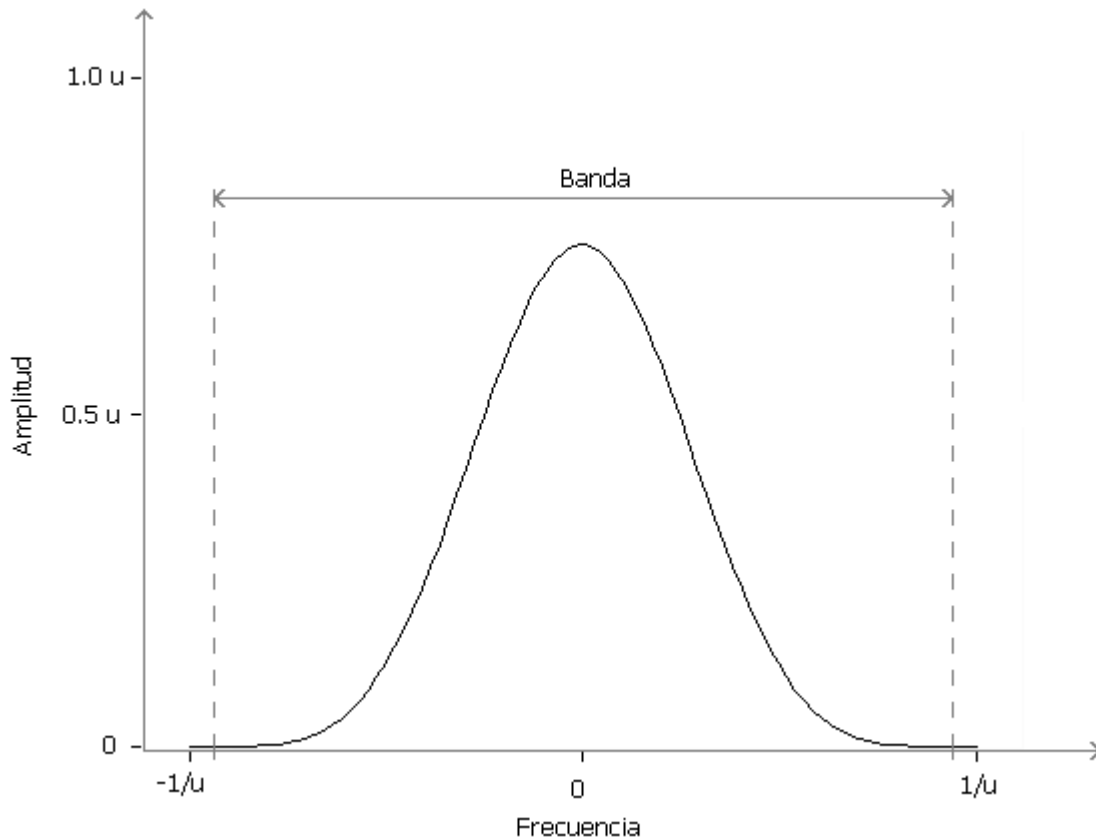


Figura 3.86. Ventana de Parzen.

El proceso para el suavizado de un conjunto de datos A utilizando la ventana de Parzen es el siguiente (ver figura 3.87):

Se agregan ceros al inicio y al final del conjunto de datos A para crear un conjunto de datos B. Después se coloca la ventana de Parzen encima del conjunto de datos B, de manera que el inicio de la ventana de Parzen coincida con el inicio del conjunto B. A continuación, se multiplica punto a punto la ventana de Parzen por la porción de datos del conjunto B con la que hay coincidencia y se suman los productos para obtener un dato, el cual será el primer elemento de un conjunto C de datos suavizados. Una vez hecho lo anterior, se mueve la ventana de Parzen hacia la derecha, de manera que el inicio de la ventana de Parzen coincida con el inicio del conjunto B más uno. Se multiplica punto a punto la ventana de Parzen por la nueva porción de datos del conjunto B con la que hay coincidencia y se suman los productos para obtener otro dato, el cual será el segundo elemento del conjunto C de datos suavizados. El proceso descrito anteriormente se repite hasta que la ventana de Parzen haya pasado por todo el conjunto de datos B y el fin de la ventana de Parzen coincida con el fin del conjunto de datos B, de tal forma que al final estará completo el conjunto C de datos suavizados.

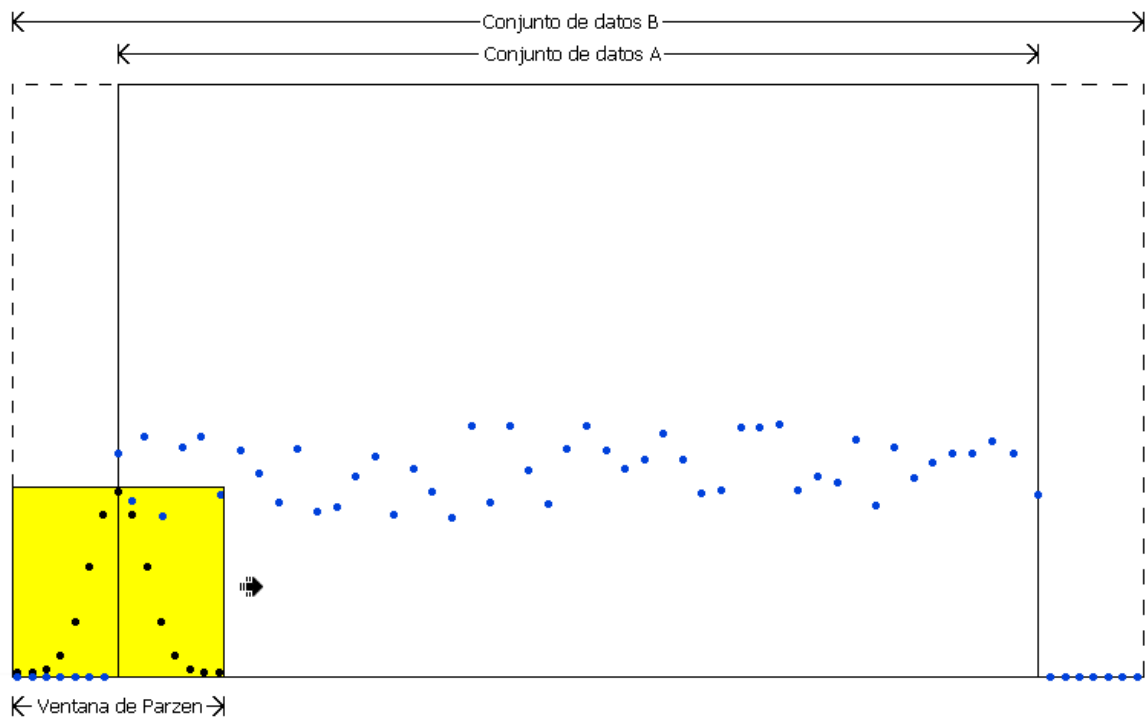


Figura 3.87. Algoritmo para el suavizado con la ventana de Parzen.

El diagrama de bloques del subVI “ventana de Parzen” (figura 3.88) se encarga de implementar las ecuaciones 3.3 y 3.4 para generar una ventana de Parzen. En el diagrama de bloques se tienen como valores de entrada el factor de suavizados (banda) y delta f , a partir de los cuales se genera la ventana de Parzen de frecuencias positivas en un ciclo *for*. Después, como la ventana de Parzen es simétrica se utiliza la ventana de Parzen de frecuencias positivas para generar la ventana de Parzen de frecuencias negativas. Finalmente, se une la ventana de Parzen de frecuencias positivas con la ventana de Parzen

de frecuencias negativas para formar una sola ventana de Parzen, cuyos datos se escriben en la variable global *ventana de Parzen*.

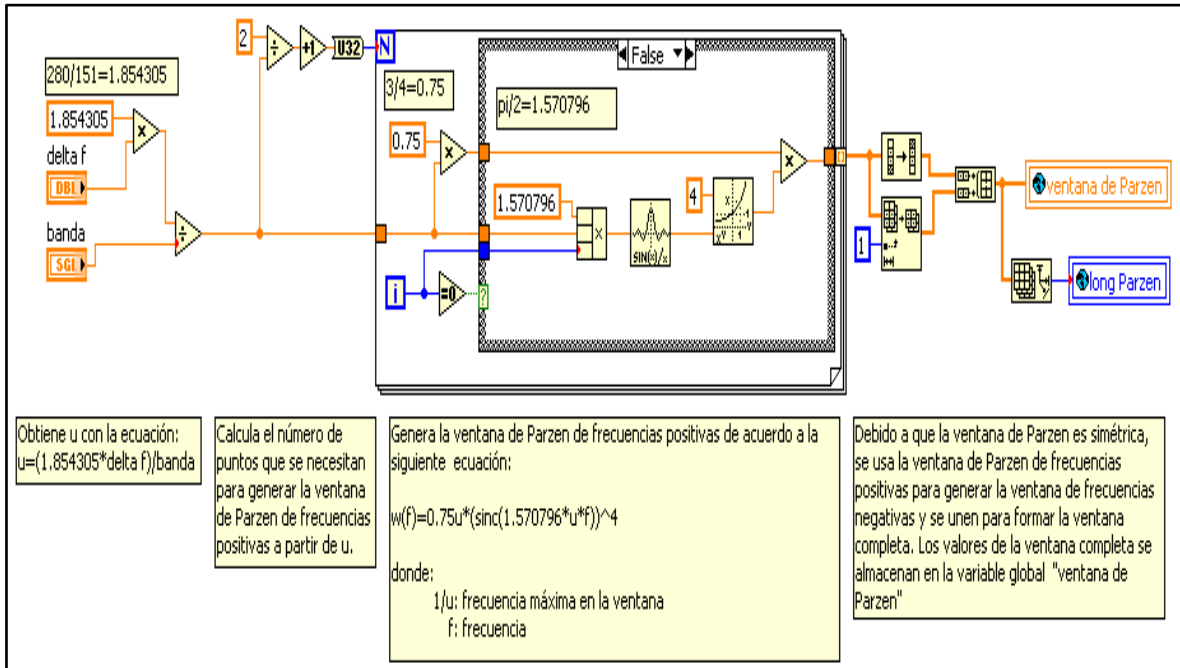


Figura 3.88. Genera ventana de Parzen.

El diagrama de bloques presentado en la figura 3.89 corresponde al subVI "suavizado ventana de Parzen". La función de este subVI es suavizar los datos de una ventana utilizando los datos de la ventana de Parzen generada en el subVI "ventana de Parzen". Para realizar dicha tarea, se programa en el diagrama de bloques de la figura 3.89 el proceso de suavizado descrito en la página anterior.

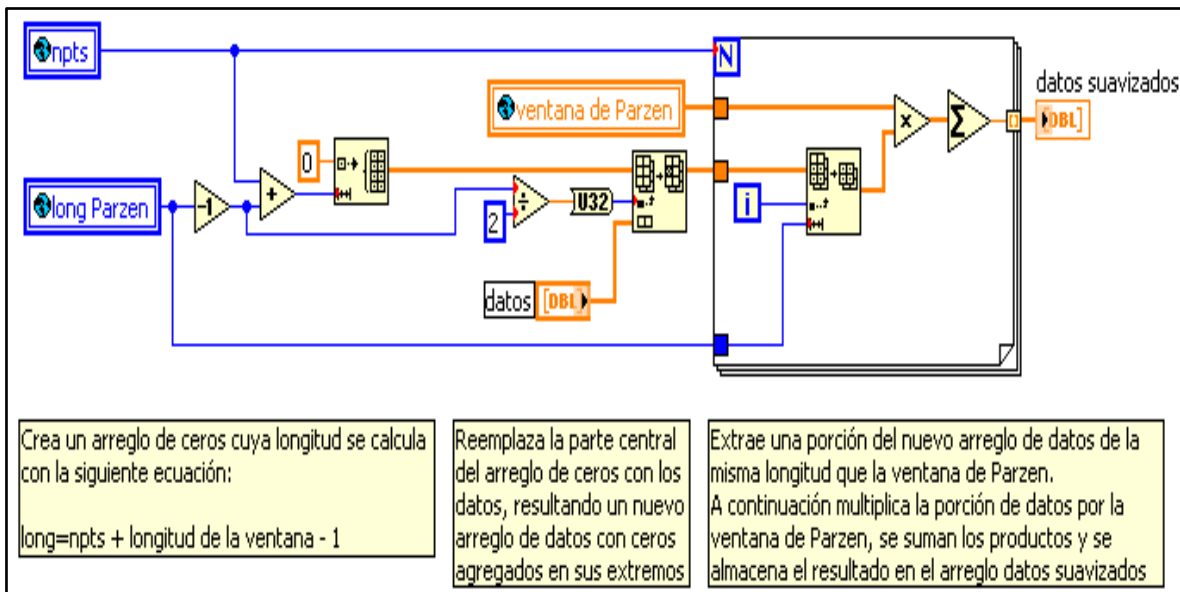


Figura 3.89. Suavizado de datos con la ventana de Parzen.

Transición de la página Espectros de potencia a la página Coeficientes de autocorrelación

Cuando se presiona el botón *Siguiente* en la página *Espectros de potencia* aparece la página *Coeficientes de autocorrelación* en la cual se muestra, en un subpanel, un arreglo de gráficas correspondiente a los coeficientes de autocorrelación de las ventanas en las que se dividieron los registros de datos.

El diagrama de bloques que actualiza el estado de página *Coeficientes de autocorrelación* cuando se realiza la transición de la página *Espectros de potencia* a la página *Coeficientes de autocorrelación* es el que se presenta en la figura 3.90. En este diagrama de bloques lo que se hace es utilizar el VI server para abrir y ejecutar un VI que grafica los coeficientes de autocorrelación de las ventanas en un arreglo de gráficas. Este arreglo de gráficas es un indicador que se encuentra en el panel frontal del VI, que grafica los coeficientes de autocorrelación, por lo que para presentar el arreglo de gráficas se carga el panel frontal del VI, que grafica los coeficientes de autocorrelación en el subpanel de la página *Coeficientes de autocorrelación*.

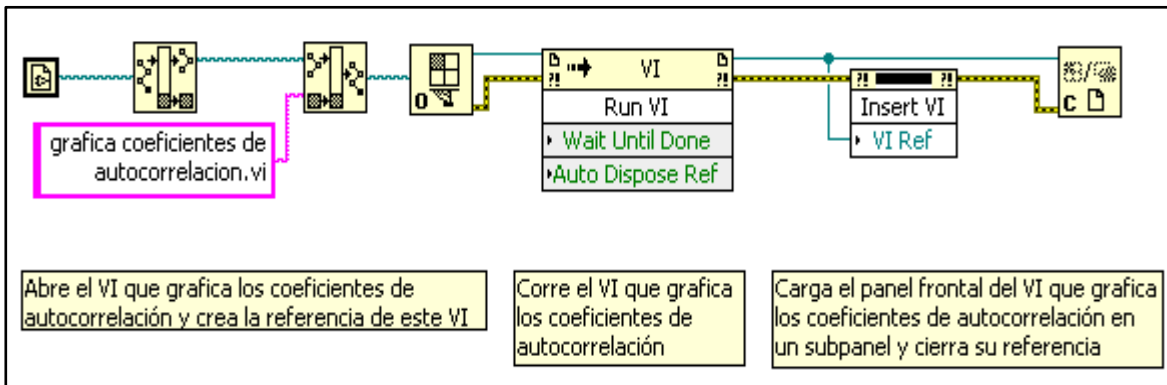


Figura 3.90. Transición de la página *Espectros de potencia* a la página *Coeficientes de autocorrelación*.

El diagrama de bloques del VI que grafica los coeficientes de autocorrelación de las ventanas se puede observar en la figura 3.91. En este diagrama de bloques se tiene una estructura llamada *flat sequence*, la cual consta de 2 *frames* que se ejecutan secuencialmente.

El primer *frame* se encarga de graficar los coeficientes de autocorrelación de las ventanas en un arreglo de gráficas. El código de este *frame* funciona como sigue:

Se utiliza el número de ventanas para calcular el número de renglones que debe tener el arreglo de gráficas que se utilizará para graficar los coeficientes de autocorrelación. Después, considerando que la variable global *Coeficientes* es un arreglo unidimensional, que contiene los coeficientes de autocorrelación de todas las ventanas, se convierte este arreglo unidimensional a un arreglo bidimensional de cuatro columnas por n renglones, donde n corresponde al número de renglones calculado. El arreglo bidimensional resultado de la conversión se utiliza para graficar los coeficientes de autocorrelación en el arreglo de

gráficas. Finalmente, con base en la distancia entre estaciones y el número de ventanas se establece el título del arreglo de gráficas.

En el segundo *frame* se obtiene la información de la imagen del arreglo de gráficas, utilizando para ello el nodo de invocación *Get image*. La información de la imagen se almacena en una variable global llamada *grafica coeficientes*, para que después se pueda utilizar si se desea guardar la imagen en un archivo con formato *jpeg*.

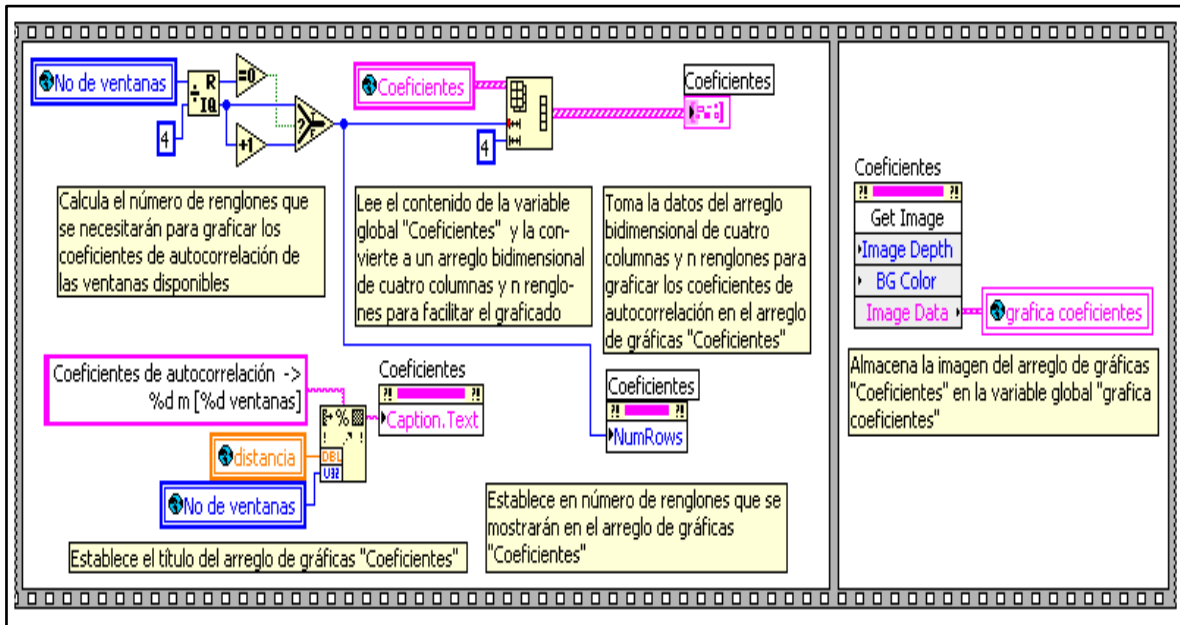


Figura 3.91. VI que grafica los coeficientes de autocorrelación.

Transición de la página Coeficientes de autocorrelación a la página Coeficiente de autocorrelación promediado

En la página *Coeficientes de autocorrelación*, el usuario observa el arreglo de gráficas de los coeficientes de autocorrelación de las ventanas en las que se dividieron los registros de datos. Con base en lo observado, en el control de la página *Coeficientes de autocorrelación* se elige la opción *Todas*, si se utilizarán los coeficientes de autocorrelación de todas las ventanas para calcular el coeficiente de autocorrelación promediado, o se elige *Selección* y se especifica un conjunto de ventanas, si se utilizarán los coeficientes de autocorrelación de estas ventanas para calcular el coeficiente de autocorrelación promediado. De manera que, cuando se presiona el botón *Siguiente* en la página *Coeficientes de autocorrelación*, se realiza la transición hacia la página *Coeficiente de autocorrelación promediado*, y justamente durante esta transición es cuando se calcula y grafica el coeficiente de autocorrelación promediado.

El diagrama de bloques que se ejecuta durante la transición de la página *Coeficientes de autocorrelación* a la página *Coeficiente de autocorrelación promediado* se muestra en la figura 3.92. En este diagrama lo primero que se hace es verificar en una estructura *case* la opción escogida. Si la opción escogida es *Todas*, se crea un arreglo de valores enteros, cuyos elementos serán los números de todas las ventanas. Si la opción

escogida es *Selección*, se crea un arreglo de valores enteros, cuyos elementos serán los números del conjunto de ventanas especificadas. El arreglo de valores enteros generado en una u otra opción se ingresa a un subVI que calcula el coeficiente de autocorrelación promediado y a la salida devuelve un *cluster* para graficar el coeficiente de autocorrelación promediado. Además, en ambas opciones se crean y establecen los títulos de las gráficas del coeficiente de autocorrelación promediado y de la curva de dispersión, de acuerdo a la opción elegida.

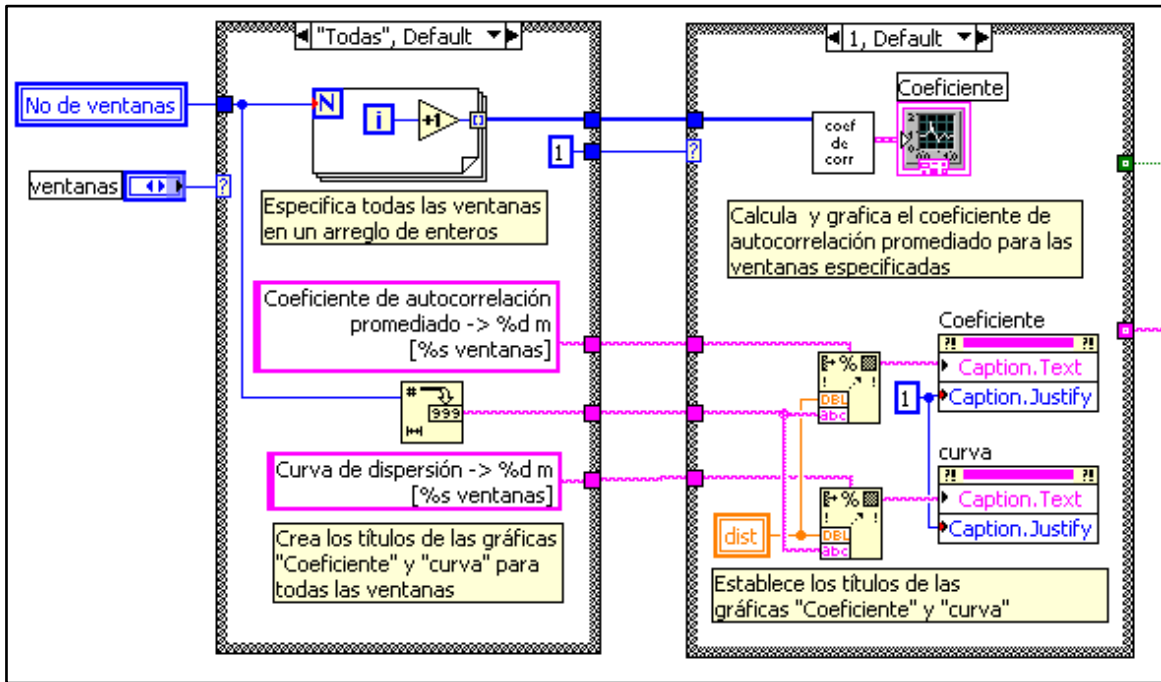


Figura 3.92. Transición de la página *Coeficientes de autocorrelación* a la página *Coeficiente de autocorrelación promediado*.

El diagrama de bloques del subVI utilizado para el cálculo del coeficiente de autocorrelación promediado se presenta en la figura 3.93. En este subVI primero se lee el arreglo de valores enteros que contiene los números de las ventanas que se utilizarán para calcular el coeficiente de autocorrelación promediado. La longitud del arreglo de valores enteros establece el número de iteraciones que se ejecutará un ciclo *for*. En cada iteración de este ciclo *for* se realiza lo siguiente:

Se utiliza un elemento del arreglo de enteros para indicar el renglón que se extraerá de las variables globales *COA*, *COB* y *COC*, las cuales son arreglos bidimensionales, cuyos renglones contienen los coeficientes de autocorrelación de cada ventana. Con los tres renglones extraídos se hace un promedio para obtener un arreglo unidimensional, el cual es el coeficiente de autocorrelación promediado de una ventana. Este arreglo unidimensional se suma punto a punto con el arreglo unidimensional obtenido en la iteración anterior, de manera que al finalizar el ciclo *for* se obtendrá un solo arreglo unidimensional que contendrá el coeficiente de autocorrelación de las ventanas especificadas sin promediar.

Una vez terminada la ejecución del ciclo *for*, se divide el coeficiente de autocorrelación sin promediar entre la longitud del arreglo de valores enteros para obtener el coeficiente de autocorrelación promediado. Este coeficiente de autocorrelación promediado se almacena en una variable global llamada *coeficiente* y se utiliza para formar un *cluster* que devolverá este subVI para facilitar el graficado.

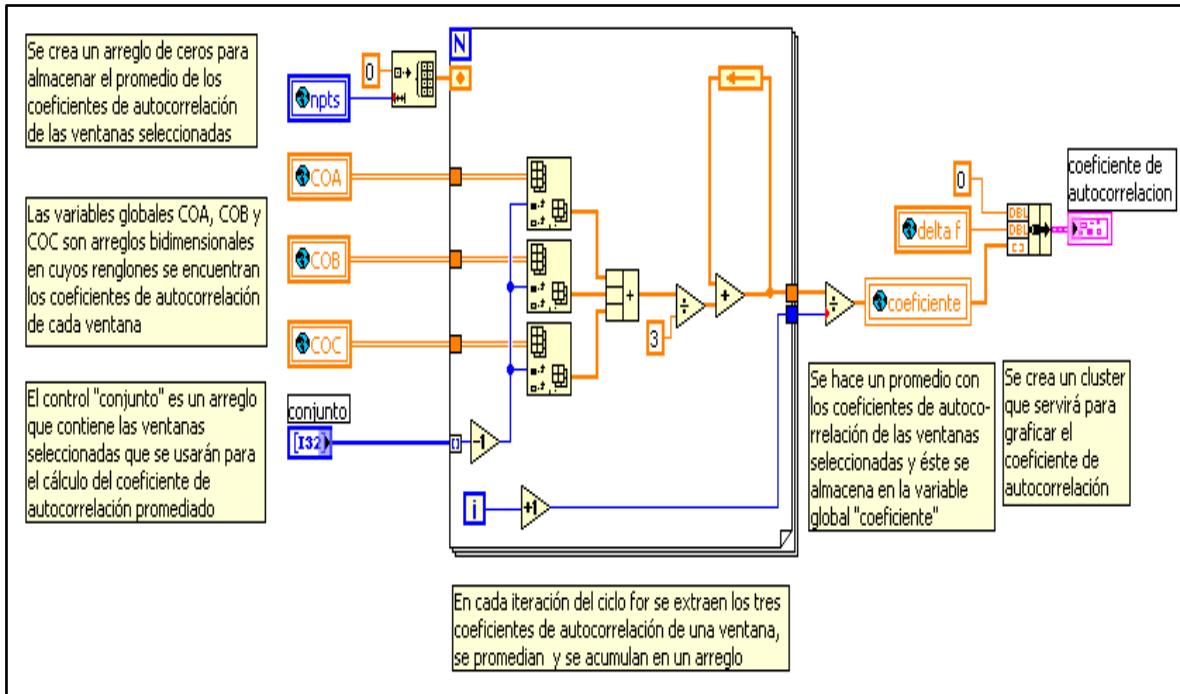


Figura 3.93. SubVI para calcular el coeficiente de autocorrelación promediado.

Transición de la página *Coficiente de autocorrelación promediado* a la página *Curva de dispersión*

Durante la transición de la página *Coficiente de autocorrelación promediado* a la página *Curva de dispersión*, se ejecuta un subVI que devuelve los datos de la curva de dispersión de velocidad de fase para poder mostrarlos en la gráfica que aparece en la página *Curva dispersión*.

El diagrama de bloques del subVI encargado de realizar los cálculos y devolver los datos de la curva de dispersión de velocidad de fase se muestra en la figura 3.94. El diagrama de bloques de este subVI funciona de la siguiente manera:

Al inicio se tiene un arreglo bidimensional, el cual almacena los datos de una función Bessel de tipo uno y orden cero $J_0(x)$, evaluada para valores de x de 0 a 15 en pasos de 0.01 y cuya gráfica es similar a la de la figura 2.8. En este arreglo bidimensional se separa en dos arreglos unidimensionales: uno que contiene los valores de x y otro que contiene los datos de la función Bessel. También se tienen los datos del coeficiente de autocorrelación promediado, el valor de la distancia entre estaciones, el valor de delta f y el número de puntos, pasados a través de las variables globales *coeficiente*, *distancia*, *delta f* y *npts*, respectivamente. Los arreglos y las variables globales mencionadas se ingresan a un

formula node, en donde se implementa, mediante código desarrollado en lenguaje C, el algoritmo descrito en las páginas 15 y 16 para el cálculo de la velocidad de fase. El *formula node* entrega a la salida un arreglo que contiene la velocidad de fase, un arreglo que contiene las frecuencias correspondientes a la velocidad de fase calculada y los valores de delta f y la distancia entre estaciones. Con el arreglo que contiene la velocidad de fase y el arreglo de frecuencias se crea una tabla de dos columnas, en donde la primera columna contiene las frecuencias y la segunda columna contiene la velocidad de fase. Esta tabla se almacena en una variable global llamada *vel fase* para que más adelante se puedan guardar los datos de la tabla en un archivo de texto. Después, en un ciclo *for*, se utilizan los valores de delta f y la distancia entre estaciones, para generar dos arreglos que contienen los datos de las dos líneas rectas que definen los límites semi-empíricos de confiabilidad descritos por las ecuaciones 2.16 y 2.17. Utilizando el arreglo que contiene la velocidad de fase y los arreglos que contienen los datos de las líneas rectas, se construye un *cluster* que facilitará el graficado. Este *cluster* se devuelve en un indicador para que se grafique fuera del subVI de la figura 3.94 la curva de dispersión de velocidad de fase y las líneas rectas que definen los límites semi-empíricos de confiabilidad.

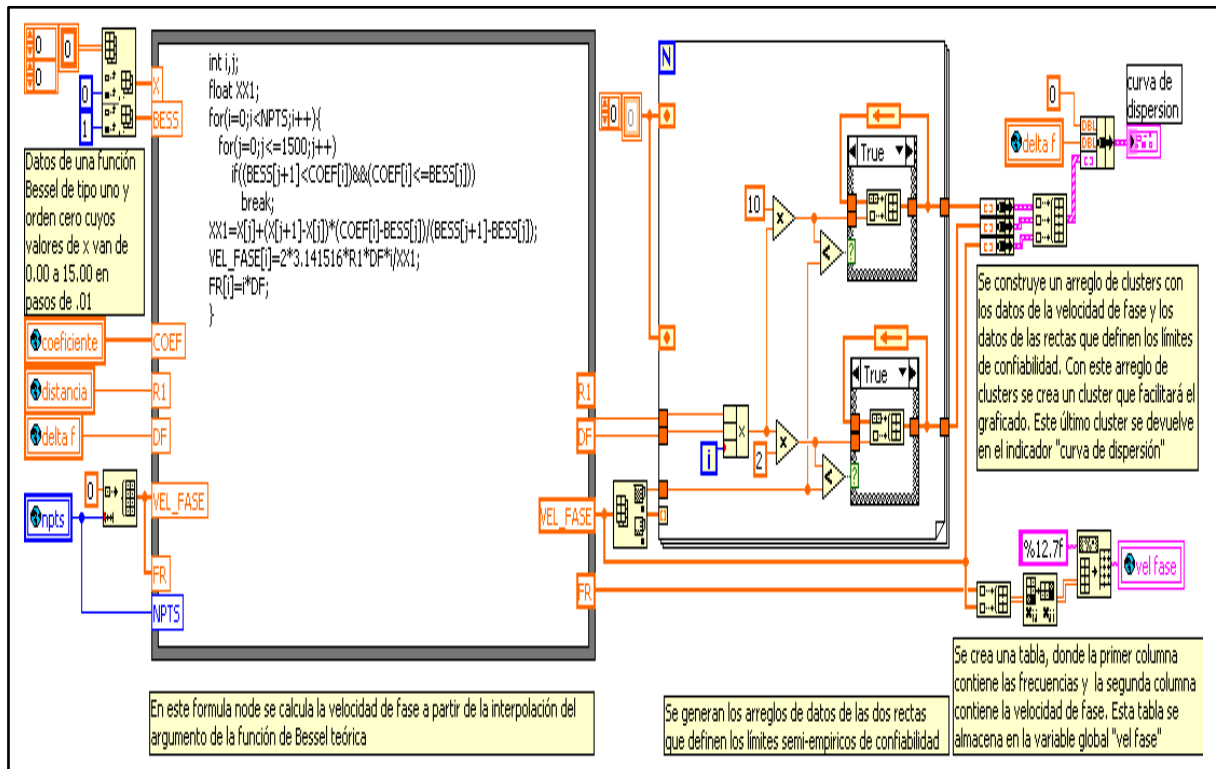


Figura 3.94. SubVI para el cálculo de la curva de velocidad de fase.

Transición de la página Curva de dispersión a la página Archivos de Salida

La transición de la página *Curva de dispersión* a la página *Archivos de salida* es la única de las ocho transiciones que se realizan en el asistente que no ejecuta ningún código. Esto se debe a que en la página *Archivos de salida* no se presenta ninguna gráfica o se requiere algún cálculo antes de presentarla.

Transición para finalizar el asistente de procesamiento

Esta última transición se realiza cuando se presiona el botón *Finalizar* en la página *Archivos de Salida*. El diagrama de bloques que se ejecuta durante esta transición funciona de la siguiente manera:

En la página *Archivos de salida* se tiene una casilla de verificación para especificar si se van a guardar las gráficas y los datos de la curva de dispersión en archivos. Esta casilla de verificación tiene dos estados posibles: deshabilitada o habilitada. Para el primer caso, cuando se presiona el botón *Finalizar*, no se ejecuta ninguna acción, mientras que para el segundo caso, cuando se presiona el *Finalizar*, se ejecuta el código mostrado en la figura 3.95. En este código se toma la ubicación y el nombre del folder, especificados en los controles de la página *Archivos de salida*, para construir la ruta en donde se van a crear los archivos. Después, se verifica si ya existe el folder en la ubicación especificada. Si el folder ya existe, se habilita un cuadro de diálogo para preguntar si se desea reemplazar el contenido de los archivos, en caso de que éstos existan. Si el folder no existe, éste se crea en la ubicación especificada. Una vez que ya se tiene el folder en la ubicación especificada, se obtiene la información de la imagen de las gráficas mediante el nodo de invocación *Get image* y la variable global *grafica coeficientes*, y se obtienen los datos de la curva de dispersión mediante la variable global *vel fase*. Finalmente, se utiliza la función *write jpeg file* de LabVIEW para guardar la información de las gráficas en cinco archivos con extensión *jpeg*, cuyos nombres son: dominio del tiempo, espectros de potencia, coeficientes de autocorrelación, coeficiente de autocorrelación promediado y curva de dispersión. Los datos de la curva de dispersión se guardan en un archivo de texto, cuyo nombre es *curva de dispersión.dat*.

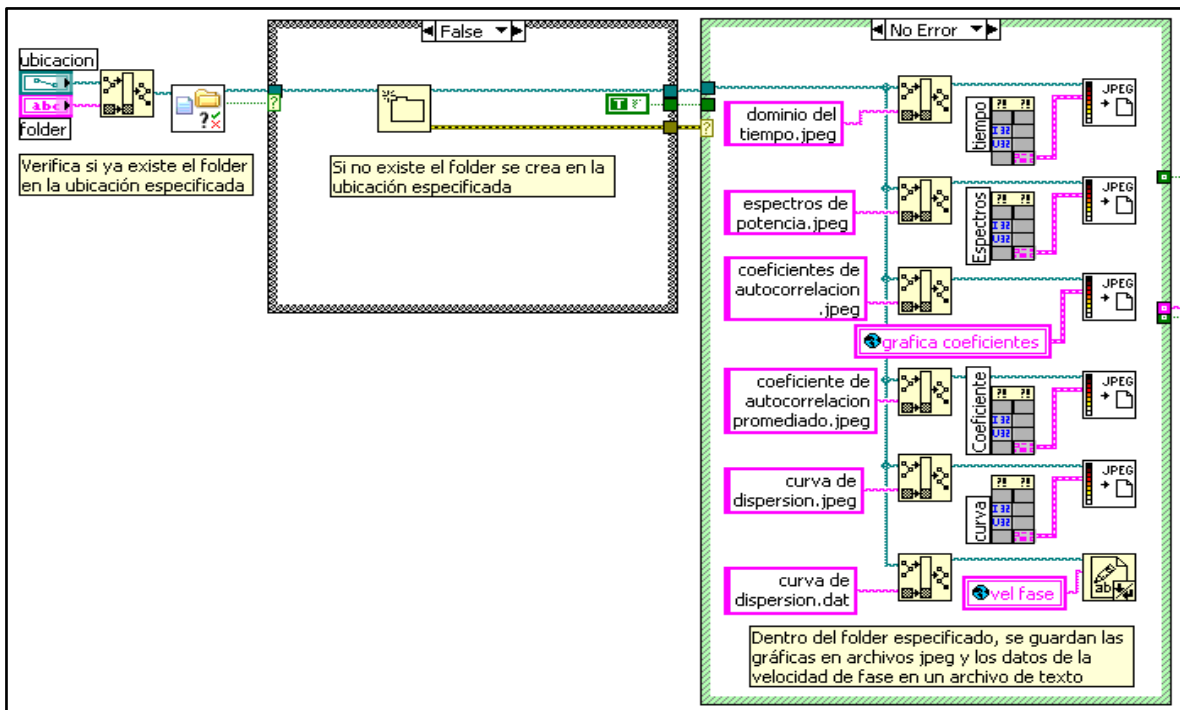


Figura 3.95. Transición para finalizar el asistente de procesamiento.

3.3.6. Menú acerca de

Al seleccionar la opción *Acerca de*, de la barra de menú, se despliega una ventana como la de la figura 3.96. En esta ventana se presenta el logotipo del Instituto de Ingeniería y los nombres de las personas que estuvieron involucradas en el desarrollo del programa. En la parte inferior de la ventana se incluye una leyenda, la cual es un requisito establecido por National Instruments para poder distribuir el programa desarrollado.



Figura 3.96. Menú *Acerca de*.

El diagrama de bloques del subVI que se ejecuta cuando se presiona el menú *Acerca de* es muy simple (ver figura 3.97). En este diagrama se tiene un ciclo *while* manejado por un solo evento. Este evento se dispara cuando se presiona el botón cerrar de la barra de título y provoca que se detenga el ciclo *while* y se cierre la ventana de la figura 3.96.

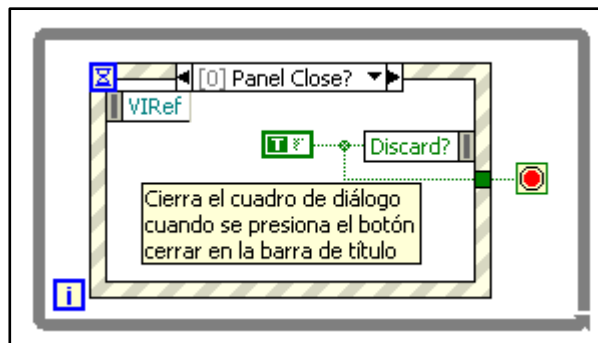


Figura 3.97. Diagrama de bloques del menú *acerca de*.

3.3.7. Distribución del programa

Existen varias maneras de distribuir los programas desarrollados en LabVIEW, sin embargo, es necesario considerar la manera en que se desea que el usuario interactúe con el programa. Para el caso del programa desarrollado se creó un programa de instalación que incluye el programa ejecutable y los controladores necesarios para poder ejecutar el programa desarrollado en cualquier computadora que cuente con el sistema operativo Windows XP o posterior, sin necesidad de que se tenga instalado LabVIEW.

Cuando se ejecuta el programa de instalación creado se abre un asistente de instalación como el que se muestra en la figura 3.98, el cual guía al usuario a través de varias pantallas para instalar correctamente el programa.

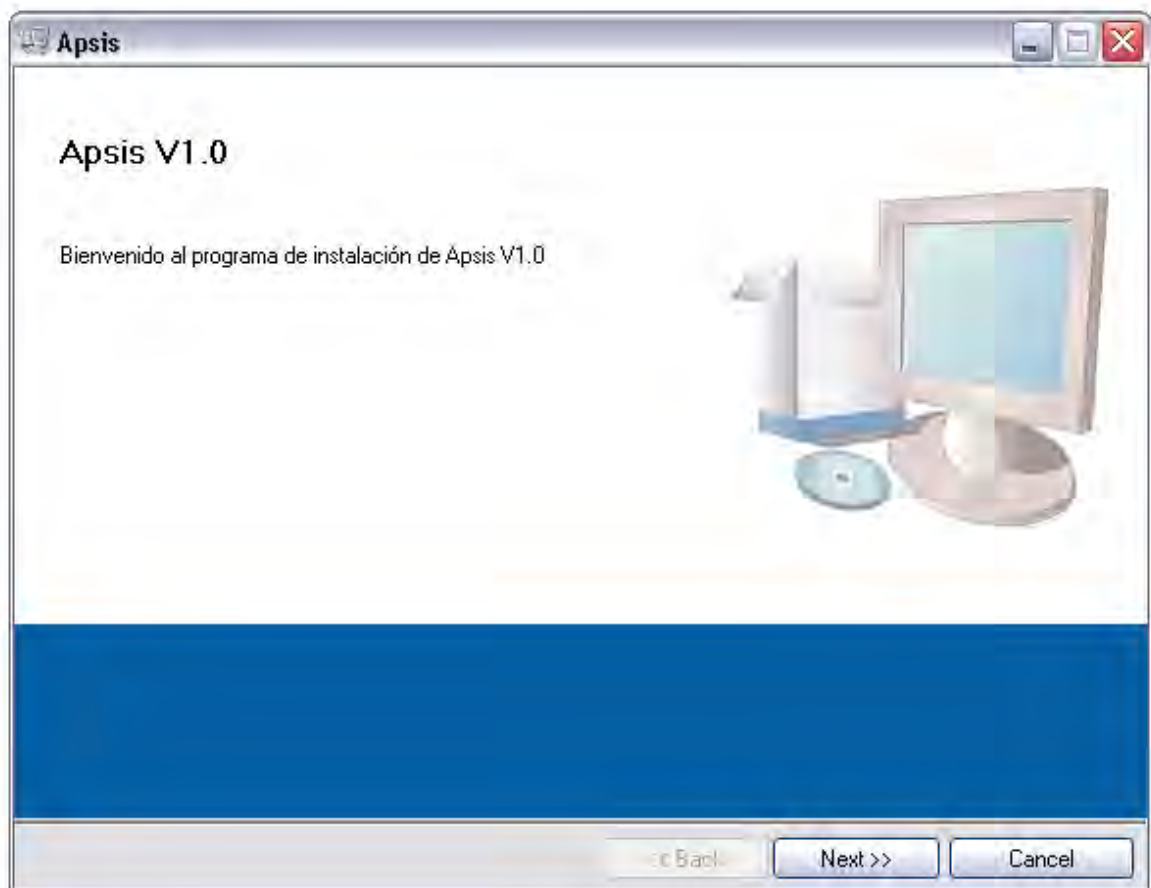


Figura 3.98. Asistente de instalación del programa.

Al finalizar el asistente de instalación se crean dos accesos directos al programa: uno en el escritorio de la computadora y otro en la barra de programas (ver figura 3.99).

Una consideración importante que se debe tener es que si el sistema operativo en el que se instaló el programa es Windows Vista, la primera vez que se corra el programa se debe hacer como administrador. Esto se debe a que el programa crea archivos de configuración en el directorio raíz y esta área está protegida en este sistema operativo. Para

correr el programa como administrador se debe dar click derecho sobre el ícono del programa y seleccionar la opción *Run as administrator*.

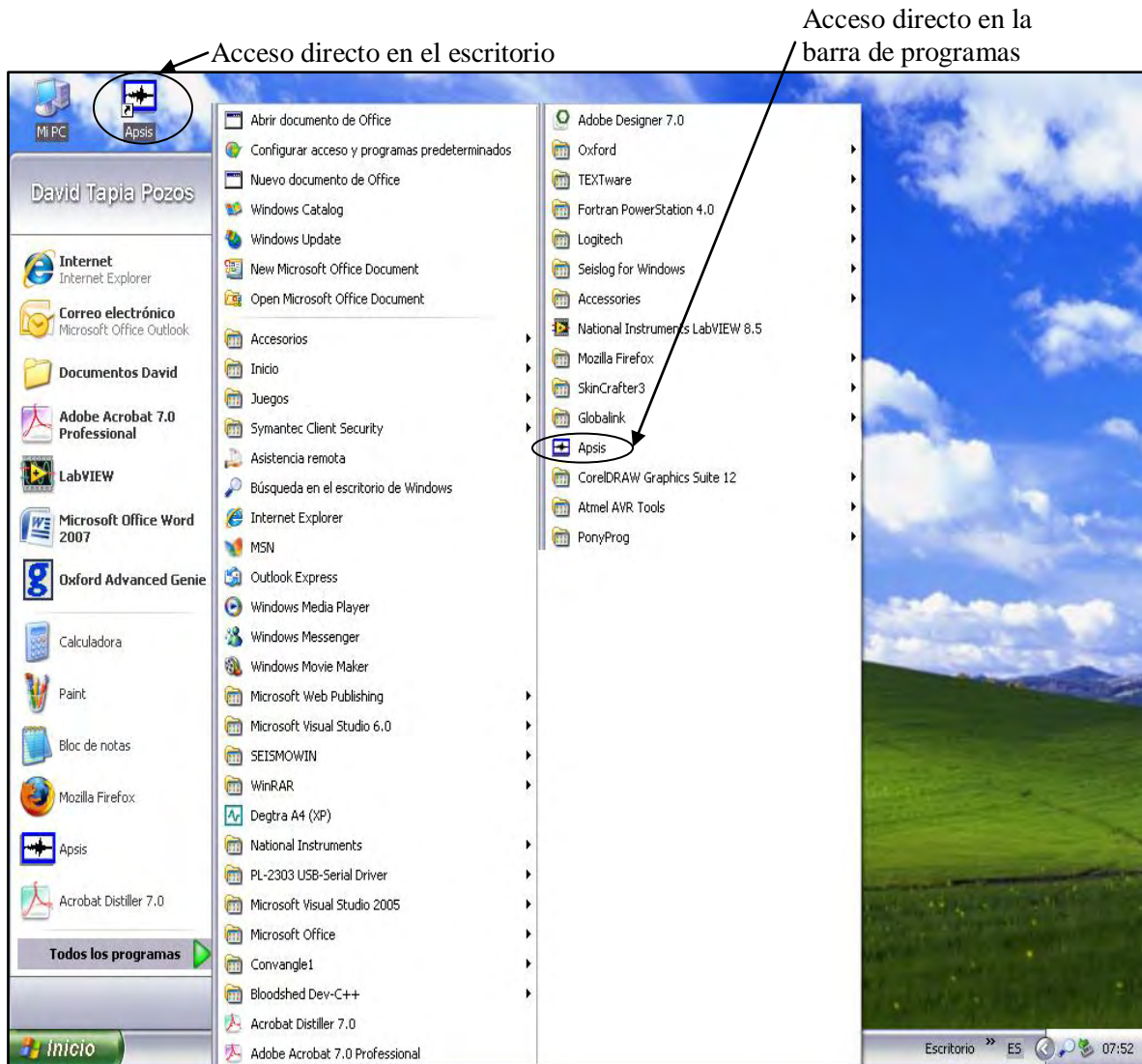


Figura 3.99. Accesos directos al programa.

4. PRUEBAS AL SISTEMA

En este capítulo se comentan las pruebas realizadas al *hardware* y al *software* del sistema. Para el caso del *hardware* se comentan las pruebas hechas a los elementos de la unidad sísmica SR04. Para el caso del *software* se comenta una de las pruebas hechas en el laboratorio y una prueba hecha en campo.

4.1. Pruebas realizadas al hardware

Las pruebas que se realizaron al *hardware* de la unidad sísmica SR04 son muy simples y únicamente se hicieron para comprobar que la unidad sísmica SR04 estuviera funcionando adecuadamente. Las pruebas comprenden los tres elementos de *hardware* que constituyen la unidad sísmica SR04: los sensores GS-11D, la tarjeta SADC20 y la tarjeta GPSDCF.

4.1.1. Prueba realizada a los sensores GS-11D

La prueba realizada a los tres sensores GS-11D de la unidad sísmica SR04 tiene la finalidad de comprobar que los sensores estén funcionando. Para esta prueba primero se verificó que cada sensor estuviera conectado a un canal físico de la tarjeta SADC20. Los sensores conectados a los canales físicos 1 y 2 miden la componente horizontal de movimiento y el sensor conectado al canal físico 3 mide la componente vertical de movimiento. Después, se conectó la unidad sísmica SR04 a una computadora, en donde se utilizó el programa desarrollado para configurar tres canales lógicos (uno por cada canal físico). Una vez configurados los canales, se corrió el programa en modo prueba y se aplicaron varios golpes en la superficie donde estaba la unidad sísmica, para que los sensores los detectaran. La respuesta de los sensores a los golpes se manifestó como una perturbación en las gráficas de los canales (ver figuras 4.1, 4.2 y 4.3), lo cual indica que los sensores estaban funcionando.

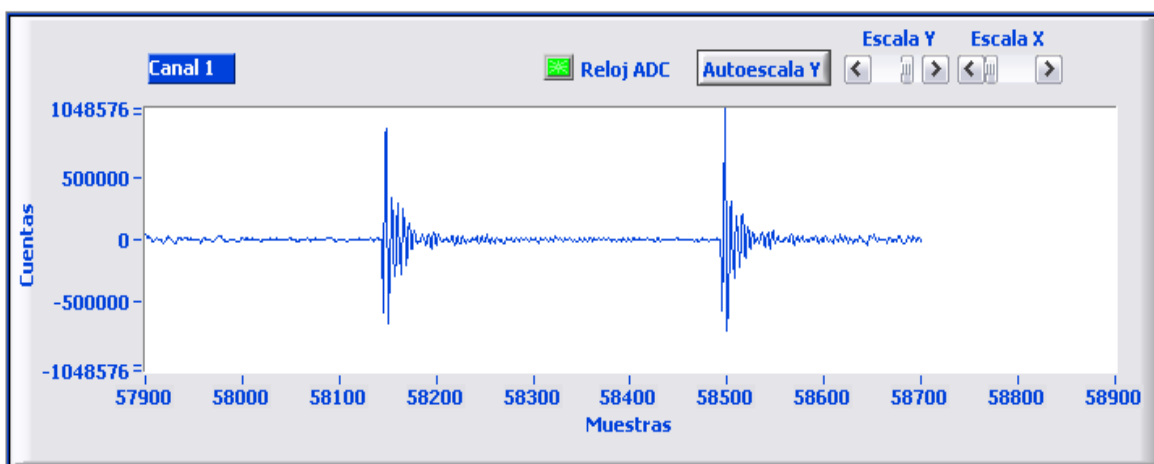


Figura 4.1. Señal del sensor 1.

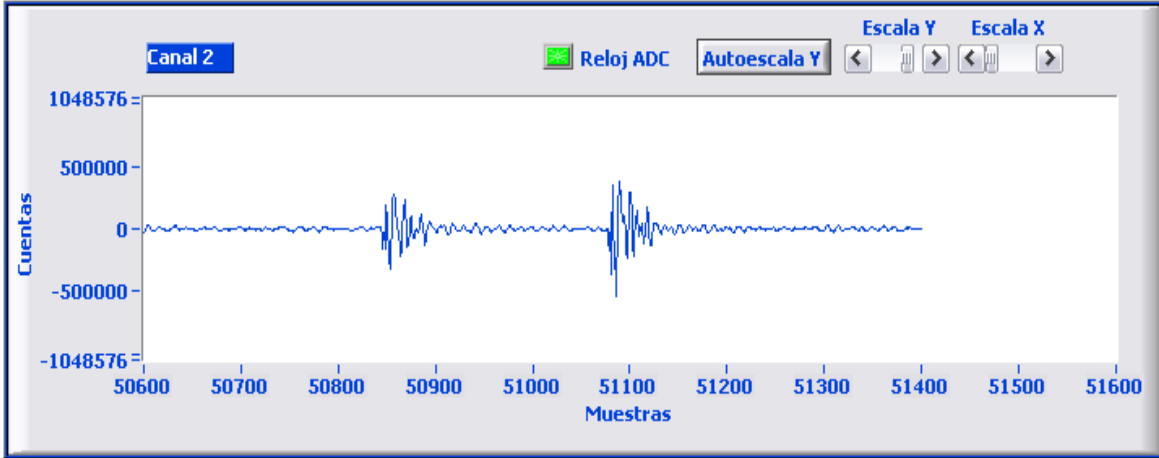


Figura 4.2. Señal del sensor 2.

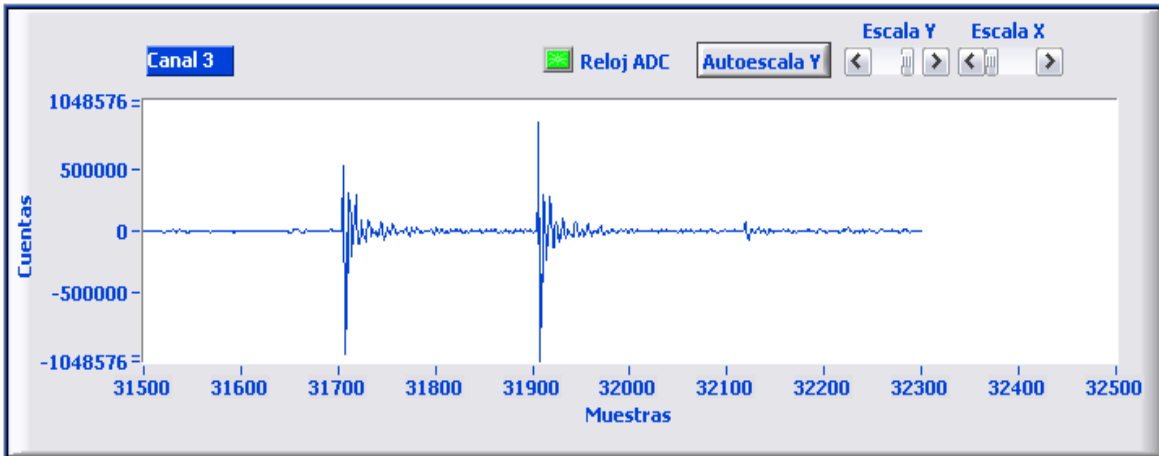


Figura 4.3. Señal del sensor 3.

4.1.2. Pruebas realizadas a la tarjeta SADC20

Para el caso de la tarjeta SADC20, las pruebas se limitaron a verificar la sensibilidad de sus ADCs y a evaluar su comportamiento a una señal de entrada de AC.

La sensibilidad de un ADC se define por la siguiente ecuación:

$$S = \frac{V_{max}}{C_{max}} \quad (4.1)$$

donde S es la sensibilidad, V_{max} es el voltaje máximo de entrada del ADC y C_{max} es el valor en *cuentas*, equivalente al voltaje máximo de entrada del ADC.

Para realizar la prueba de sensibilidad se implementó el diagrama mostrado en la figura 4.4. Una fuente de alimentación de voltaje variable se conectó a un voltímetro y a los tres canales físicos de la tarjeta SADC20. La tarjeta SADC20 se conectó a su vez a una computadora, en donde se utilizó el programa desarrollado para adquirir y graficar las

señales de sus tres canales. El voltaje de la fuente de alimentación se incrementó lentamente hasta que las señales graficadas de cada uno de los canales alcanzaron un valor máximo en *cuentas* (8388608 *cuentas*), lo cual indicó que los ADCs ya estaban saturados. Los voltajes a los que se saturaron los ADCs de cada canal fueron diferentes y se midieron en el voltímetro. Para el canal 1 el voltaje medido fue 995.65 mV, para el canal 2 el voltaje medido fue 997.61 mV y para el canal 3 el voltaje medido fue 997.25 mV. Con estos voltajes y el valor máximo en *cuentas*, se calculó la sensibilidad del ADC de cada canal, utilizando la ecuación 4.1. Las sensibilidades obtenidas fueron las siguientes: para el canal 1, 118.69 nV/*cuenta*; para el canal 2, 118.92 nV/*cuenta*; y para el canal 3, 118.88 nV/*cuenta*.

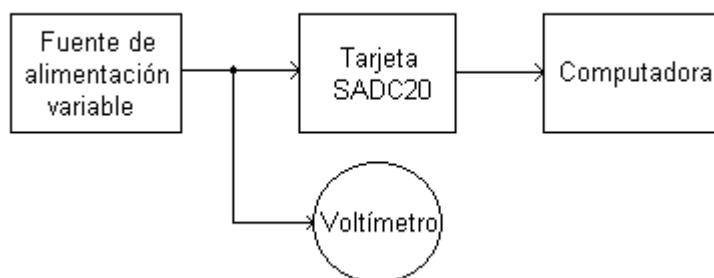


Figura 4.4. Diagrama para probar la sensibilidad de los ADCs de la tarjeta SADC20.

Para evaluar el porcentaje de error de las sensibilidades obtenidas se utilizó la siguiente expresión:

$$\%Error = \left| \frac{Valor\ experimental - Valor\ teórico}{Valor\ teórico} \right| \times 100 \quad (4.2)$$

donde el valor experimental son las sensibilidades obtenidas para cada canal y el valor teórico es el valor especificado por el fabricante (119 nV/*cuenta*). Resultado de la evaluación de la expresión 4.2, se obtuvieron los siguientes porcentajes de error: 0.26% para el canal 1, 0.067% para el canal 2 y 0.1% para el canal 3. Lo anterior indica que la sensibilidad de los ADCs de la tarjeta SADC20 son muy cercanos a lo que especifica el fabricante.

Para evaluar el comportamiento de la tarjeta SADC20 a una señal de entrada de AC se implementó el diagrama mostrado en la figura 4.5. Un generador de funciones se conectó a un osciloscopio y a los tres canales de la tarjeta SADC20, y esta última a su vez se conectó a una computadora. El generador de funciones se ajustó para obtener una señal senoidal con una amplitud pico de 51 mV y una frecuencia de 1 Hz. Estos valores de la señal senoidal se midieron en el osciloscopio. Después, en el programa desarrollado se adquirieron y se registraron los datos de los tres canales de la tarjeta SADC20 en archivos de 1 minuto de duración. Estos archivos después se abrieron para observar el comportamiento de la señal adquirida. Los datos contenidos en los archivos de los canales 1, 2 y 3 permitieron generar las gráficas mostradas en las figura 4.6, 4.7 y 4.8, respectivamente.

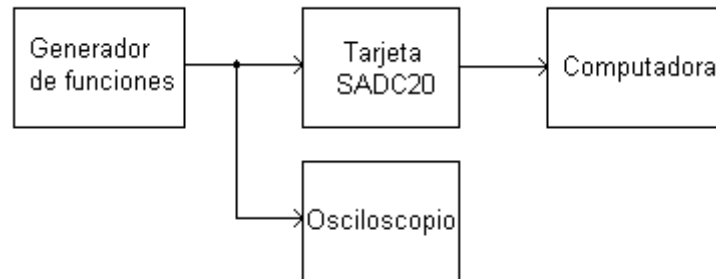


Figura 4.5. Diagrama para probar la tarjeta SADC20 bajo una señal de entrada de AC.

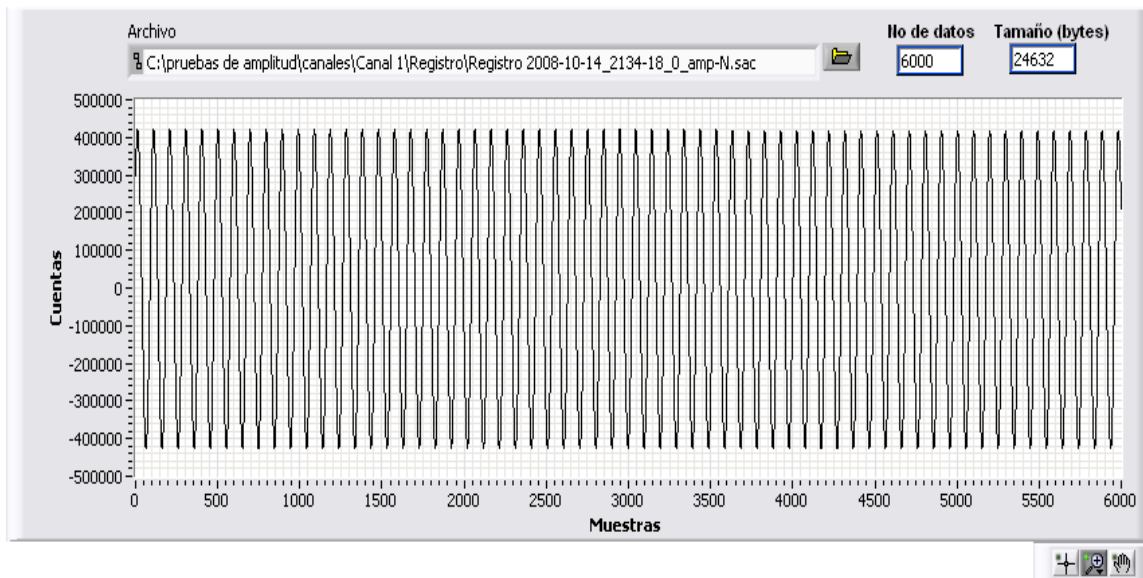


Figura 4.6. Señal senoidal registrada en el canal 1.

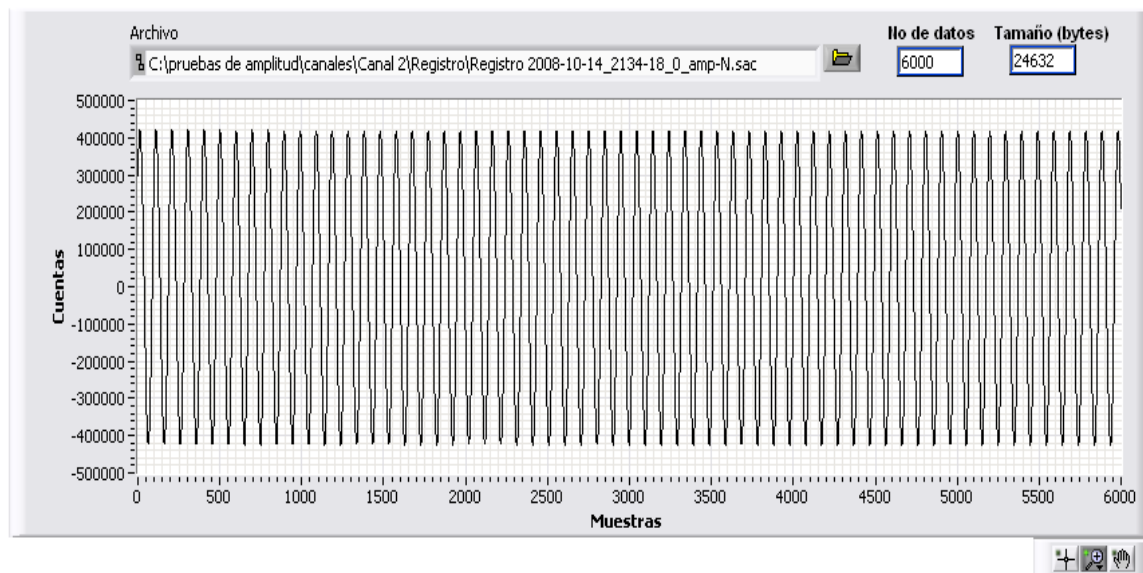


Figura 4.7. Señal senoidal registrada en el canal 2.

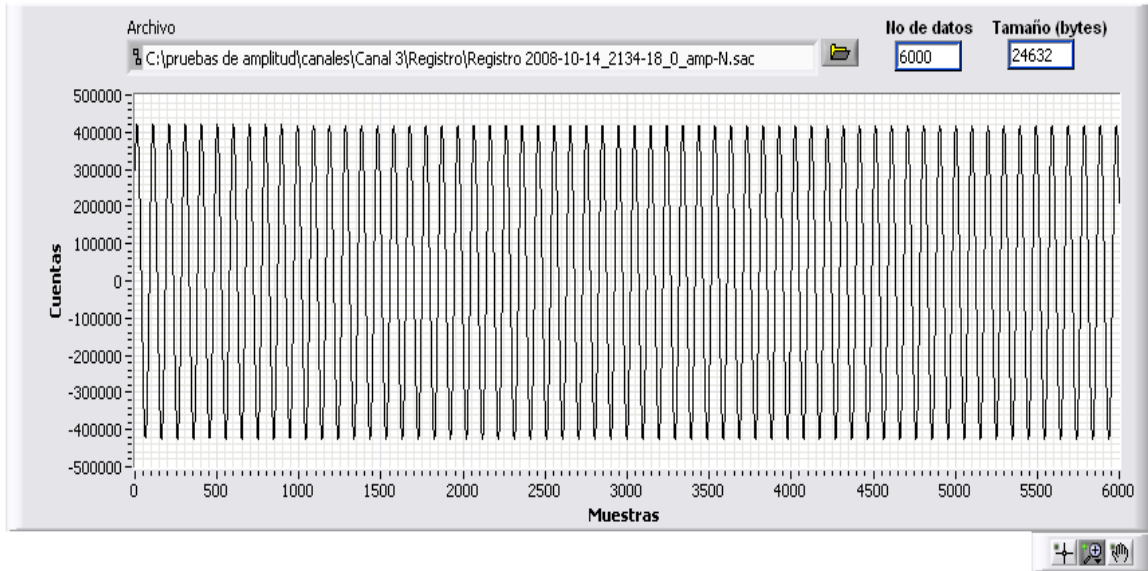


Figura 4.8. Señal senoidal registrada en el canal 3.

Con el objetivo de comparar los registros de los canales y conocer el grado de error de las señales adquiridas, en un programa aparte se generó una señal senoidal teórica con los valores de amplitud y frecuencia establecidos en el generador de funciones (ver figura 4.9).

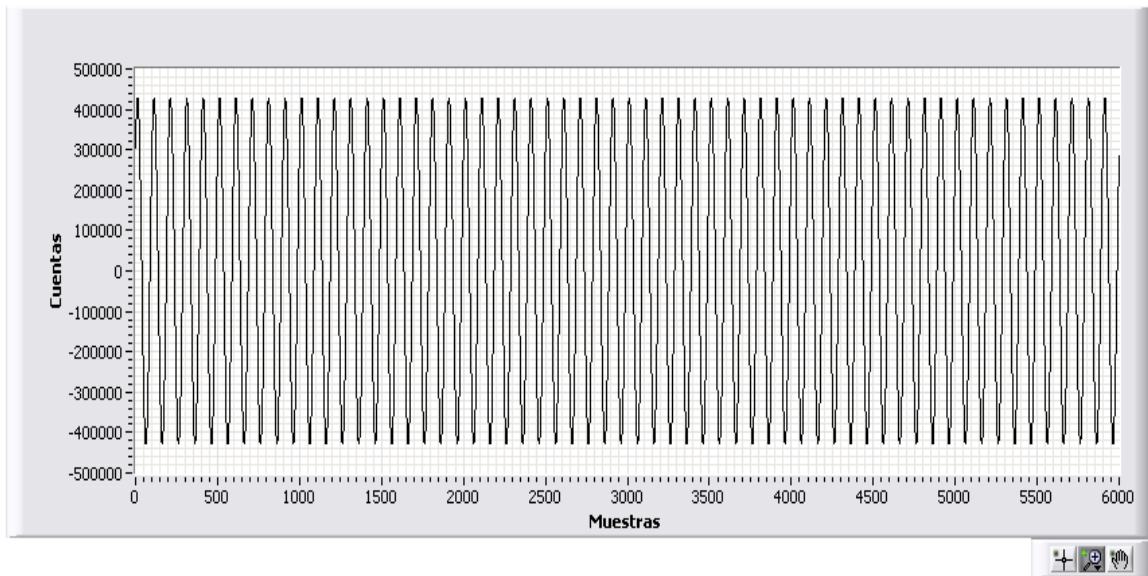


Figura 4.9 Señal senoidal teórica generada.

El comportamiento observado en las figuras 4.6, 4.7 y 4.8 tienen mucha similitud con la señal senoidal teórica mostrada en la figura 4.9. De esta comparación se puede establecer que esta prueba sirvió para dar una idea aproximada de la magnitud de la señal de entrada que está adquiriendo la unidad sísmica en sus canales.

4.1.3. Prueba realizada a la tarjeta GPSDCF

La prueba realizada a la tarjeta GPSDCF tiene como objetivo averiguar si la fecha y la hora GMT transmitidas a la computadora son correctos. Para esto se colocó la antena a cielo abierto, se conectó la antena a la unidad sísmica SR04 y esta última se conectó a una computadora. En la computadora se utilizó el programa desarrollado para configurar tres canales lógicos (uno por cada canal físico). Una vez configurados los canales, se inició la adquisición en modo prueba y en la gráfica de uno de los canales se esperó hasta que encendiera el *led* que indica cuando la fecha y la hora GMT recibida se está actualizando mediante la tarjeta GPSDCF. El tiempo que tardó en encender el *led* fue de aproximadamente 10 minutos. Después se abrió una página de internet en la cual se presenta la fecha y hora GMT actual. Esta fecha y hora GMT se comparó con la fecha y hora GMT que aparece en el monitor de estado del programa, encontrándose que son iguales. En la figura 4.10 se puede ver la comparación entre la fecha y la hora GMT recibida en el programa y la fecha y la hora GMT de la página de internet.

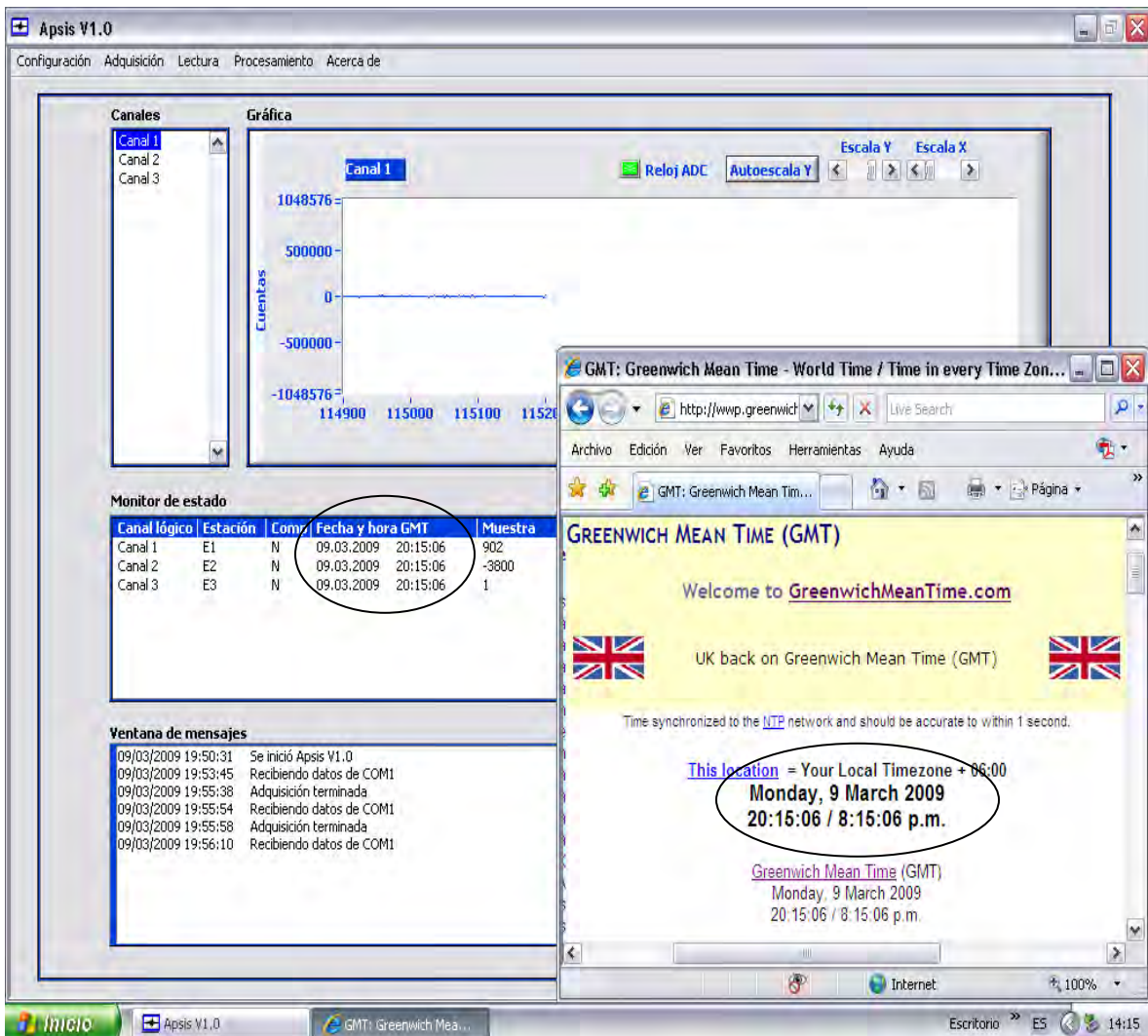


Figura 4.10. Comparación de la fecha y hora GMT.

4.2. Pruebas realizadas al software

Las pruebas realizadas al *software* tienen la finalidad de mostrar el desempeño de todas las partes que constituyen el programa desarrollado. Las pruebas que se comentan son una prueba de laboratorio y una prueba de campo. La prueba de laboratorio muestra la configuración, la adquisición y el registro de datos de varias unidades sísmicas SR04 simultáneamente, mientras que la prueba de campo muestra el procesamiento de los registros de un arreglo de 25 metros utilizando el método SPAC.

4.2.1. Prueba realizada en el laboratorio

La prueba realizada en el laboratorio evalúa el desempeño del programa cuando se están adquiriendo y registrando simultáneamente los datos de tres unidades sísmicas SR04. Para realizar dicha prueba sólo se contaba con dos unidades sísmicas, por lo que se construyó un cable RS232 que tuviera una entrada y dos salidas para simular que se tenía una tercera unidad sísmica. Así pues, se conectó una unidad sísmica al puerto de comunicaciones RS232 de la computadora, COM1, por medio de un cable, y se conectó la otra unidad sísmica a los puertos de comunicaciones USB de la computadora, COM3 y COM4, utilizando para ello el cable construido y un par de conversores RS232-USB (ver figura 4.11a). El puerto de comunicaciones COM2 no se utiliza porque en la computadora empleada para esta prueba este puerto de comunicaciones se utiliza para conectar el monitor. Después se colocaron las antenas de los receptores GPS de las unidades sísmicas lo más cerca posible de una ventana, para tener una mejor recepción (ver figura 4.11b), y se conectaron estas antenas a las unidades sísmicas por medio de los conectores BNC que tienen los cables de las antenas. Finalmente, se conectaron los cables de alimentación de energía a las unidades sísmicas para energizar sus circuitos.

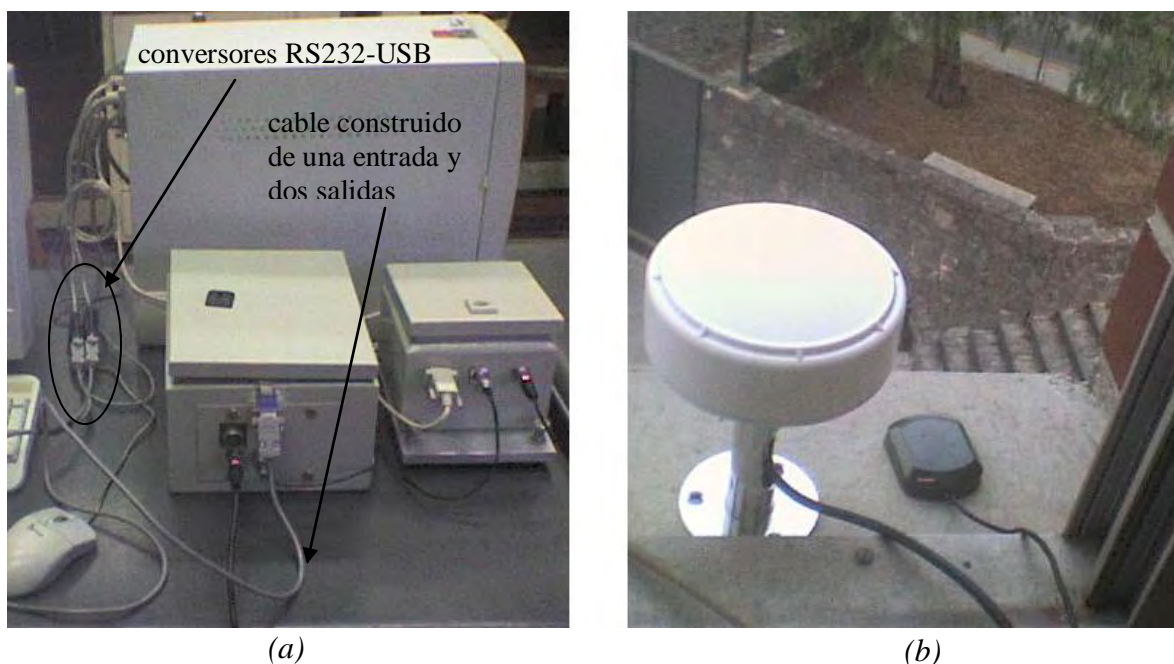


Figura 4.11. Instalación de las unidades sísmicas y las antenas de sus receptores GPS.

Una vez instaladas las unidades sísmicas se abrió el programa desarrollado en la computadora. Ya en la pantalla del programa, lo primero que se hizo fue crear el directorio base. Para ello, se abrió el cuadro de diálogo para establecer el directorio base. En este cuadro de diálogo se estableció el directorio base en la unidad C bajo el nombre “Prueba tres unidades” (ver figura 4.12).



Figura 4.12. Creación de directorio base “Prueba tres unidades”.

Para corroborar que se creó el directorio base, se navegó hasta su ubicación y se abrió su carpeta. En la figura 4.13 se muestra la ubicación del directorio base creado y la carpeta “canales” creada dentro del directorio base.

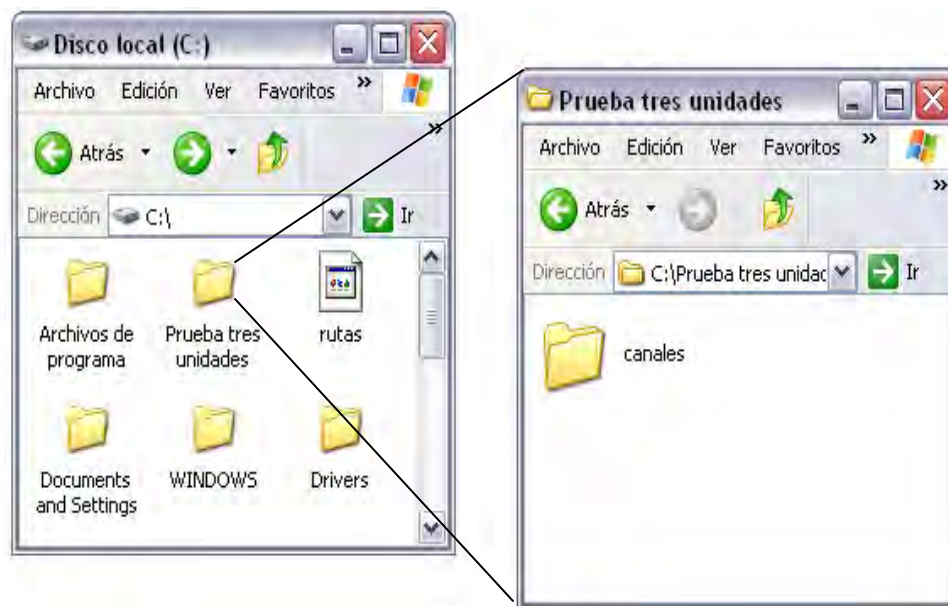


Figura 4.13. Ubicación del directorio base y la carpeta “canales”.

Una vez establecido el directorio base, se procedió a la creación de los canales necesarios para realizar la prueba. Para esto, se abrió el cuadro de diálogo del *Administrador de canales*. En el cuadro de diálogo del *Administrador de canales* se crearon nueve canales lógicos (ver figura 4.14).

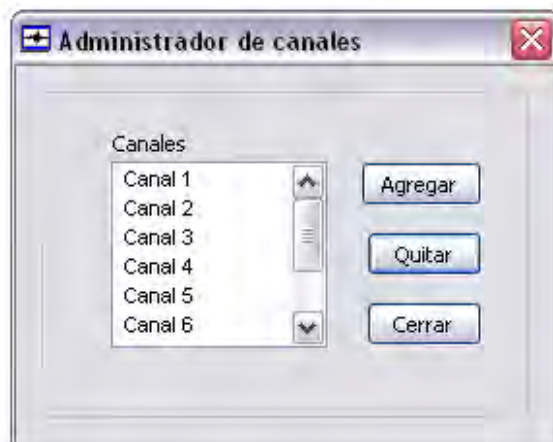


Figura 4.14. Canales creados mediante el Administrador de canales.

La configuración de los nueve canales lógicos creados se estableció en un cuadro de diálogo como el de la figura 4.15.

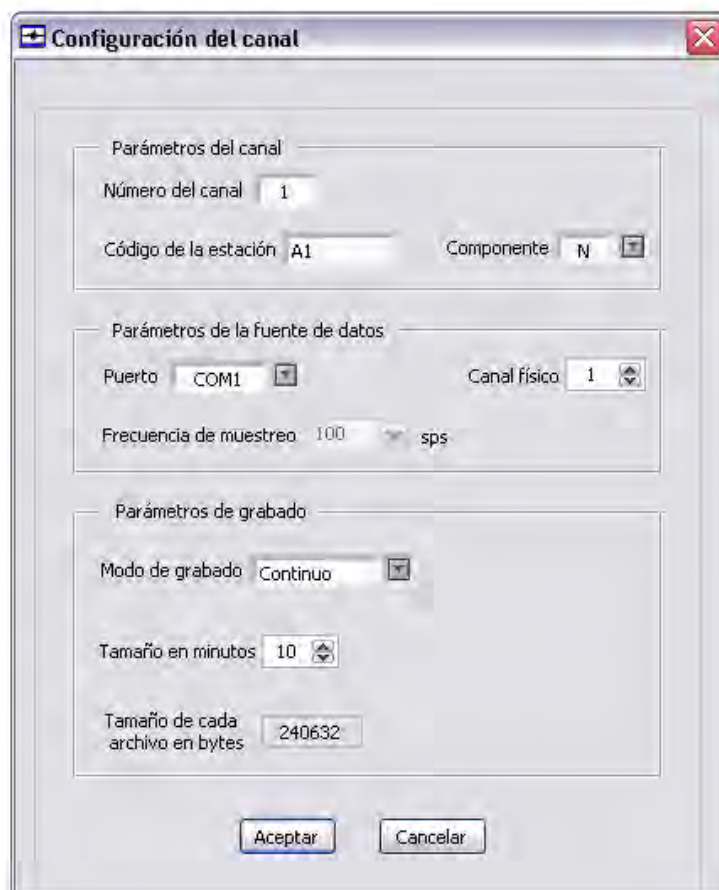


Figura 4.15. Configuración del canal 1.

Los primeros tres canales lógicos se configuraron para recibir los datos de los tres canales físicos de la unidad sísmica conectada al COM1 y registrarlos en archivos de 10 minutos, utilizando el modo de registro de datos *continuo*, los siguientes tres canales

lógicos se configuraron para recibir los datos de los tres canales físicos de la unidad sísmica conectada al COM3 y registrarlos en archivos de 10 minutos, utilizando el modo de registro de datos *continuo*, y los últimos tres canales lógicos se configuraron para recibir los datos de los tres canales físicos de la unidad sísmica conectada al COM4 y registrarlos en archivos de 10 minutos, utilizando el modo de registro de datos *ringbuffer*. En la figura 4.16 se muestra la barra de desplazamiento que aparece mientras se crean los archivos para los canales configurados en modo *ringbuffer*.

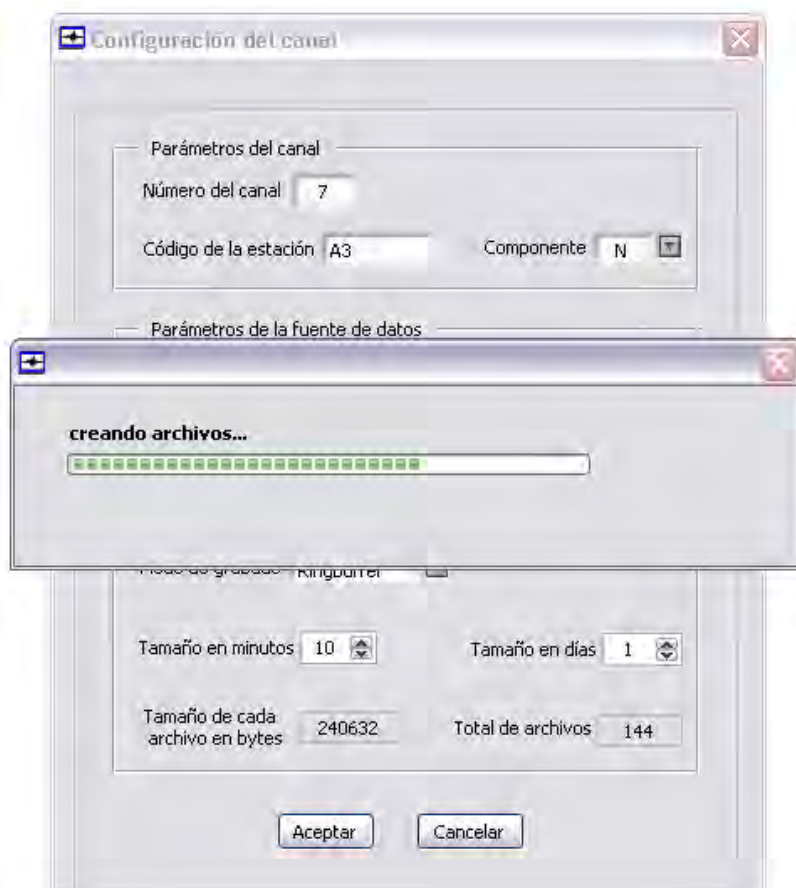


Figura 4.16. Barra de desplazamiento para el modo ringbuffer.

Al término de la configuración de los nueve canales lógicos se verificó, dentro de la carpeta "canales", que se hayan creado las carpetas de cada uno de los nueve canales lógicos. Dentro de cada una de estas carpetas se creó automáticamente una carpeta y un archivo. La carpeta se llama "Registro", debido a que dentro de ésta se crearán los archivos durante el registro de datos, y el archivo se llama "Configuración", debido a que contiene la configuración establecida para el canal. Para ilustrar lo comentado anteriormente, en la figura 4.17 se muestran las nueve carpetas de los canales configurados y el contenido de una de estas carpetas, en este caso la carpeta del canal 1. Como se ve en esta figura, dentro de la carpeta del canal 1 se tiene la carpeta de registro y el archivo de configuración, el cual se abrió con el block de notas de Windows para mostrar que ahí se encuentran los parámetros establecidos en la configuración de este canal.

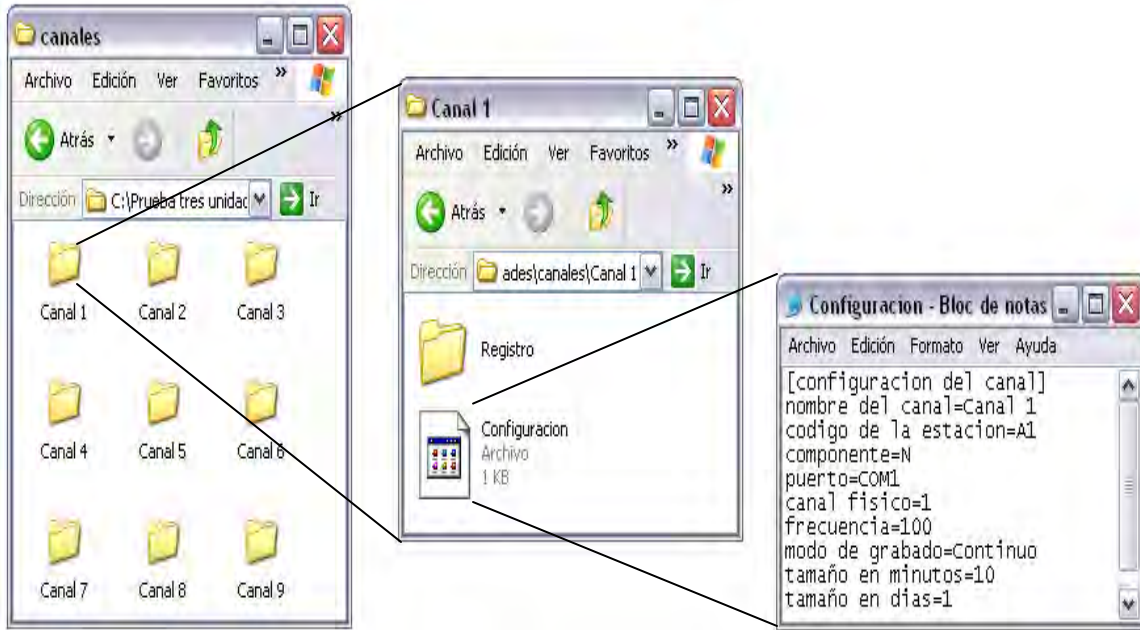


Figura 4.17. Carpetas de los canales y contenido de la carpeta del canal 1.

Para el caso de los canales 7, 8 y 9 se crearon automáticamente los archivos que constituyen sus *ringbuffers*. Como un ejemplo, en la figura 4.18 se muestran los archivos creados dentro de la carpeta de registro del canal 7 y que constituyen su *ringbuffer*. Estos archivos están vacíos y se llenarán con datos durante el registro.

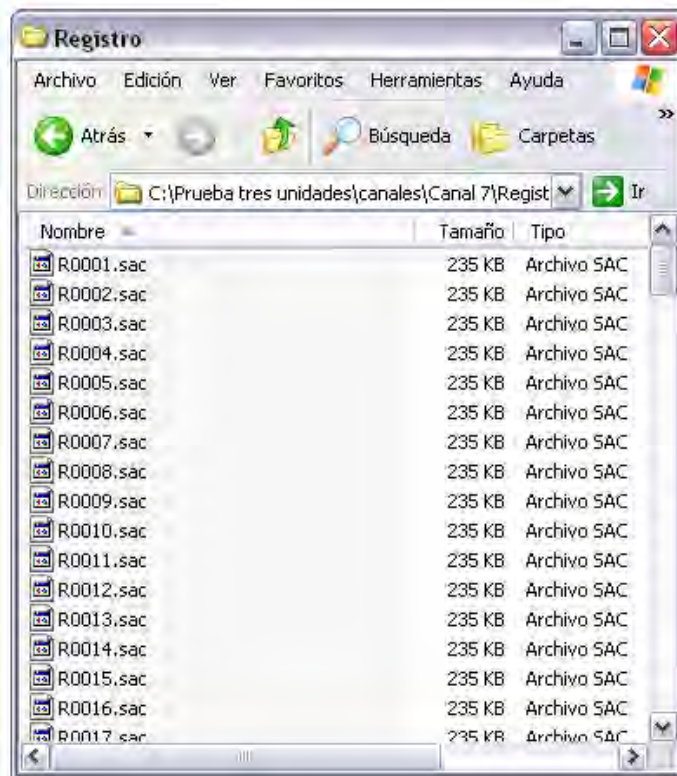


Figura 4.18. Archivos del ringbuffer del canal 7.

Después de la configuración de los canales, se procedió a realizar la adquisición y el registro de los datos provenientes de las tres unidades sísmicas conectadas. La figura 4.19 presenta la pantalla del programa durante la adquisición y el registro de los datos. En esta pantalla se puede ver que en la lista *Canales* aparecen los nombres de los nueve canales configurados, de donde se seleccionó el canal 1 para desplegar su gráfica (1).

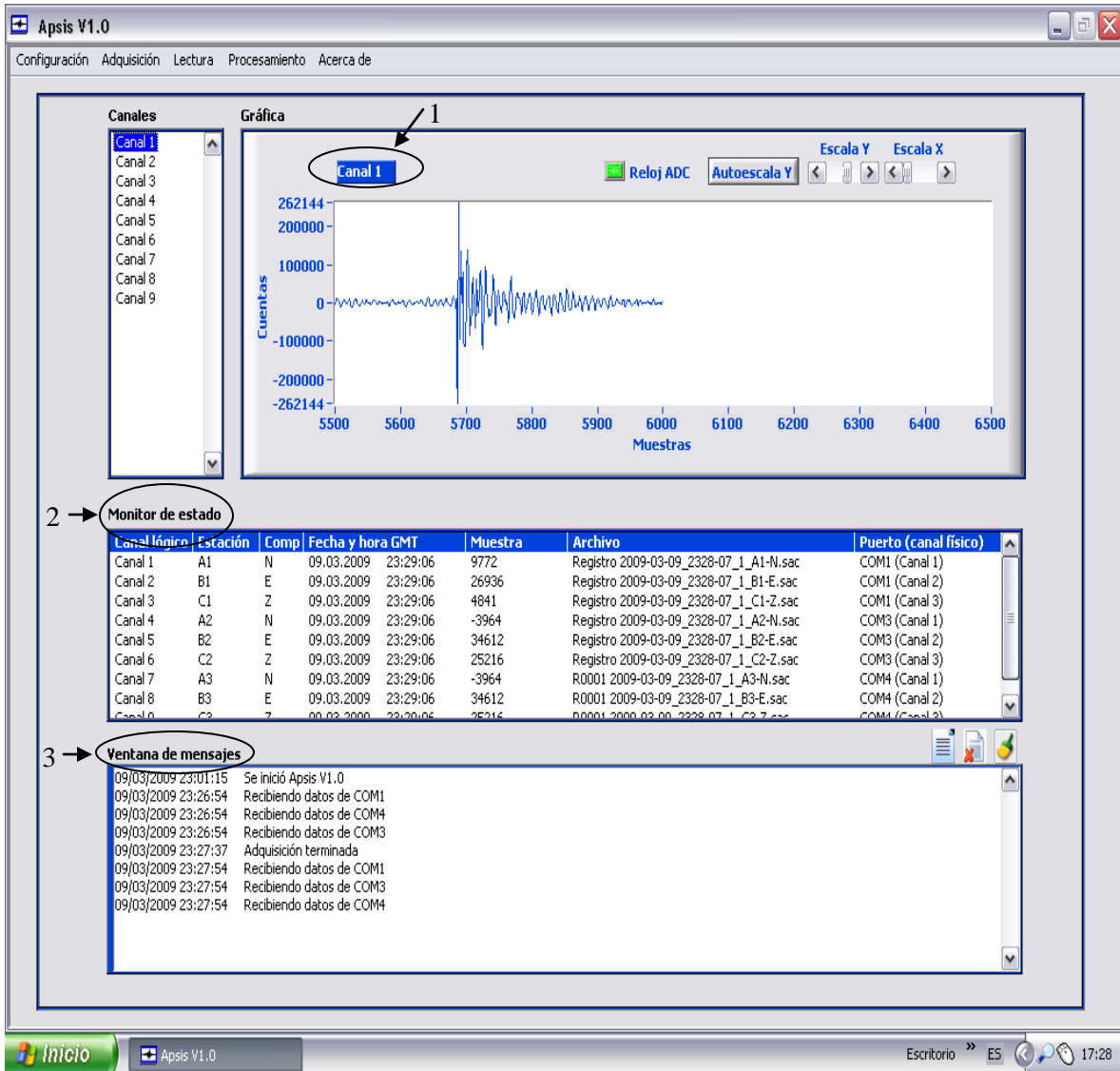


Figura 4.19. Adquisición y registro de los datos de los nueve canales configurados.

En la pantalla del programa de la figura 4.19 también se puede observar que en el *Monitor de estado* aparece el resumen de todos los canales configurados (2). Los aspectos más relevantes en el *Monitor de estado* son los siguientes:

- Los parámetros que aparecen en las columnas *Canal lógico*, *Estación*, *Comp* y *Puerto (canal físico)* coinciden con los establecidos en la configuración de los nueve canales lógicos.

- En la columna *fecha y hora GMT*, todos los canales tienen la misma fecha y hora GMT, lo que indica que no hay una variación entre los receptores GPS de las unidades sísmicas.
- En la columna *Archivo* aparecen los nombres de los archivos en donde se están grabando los datos de cada canal. La estructura de los nombres de los archivos de los primeros seis canales indica que se están grabando los datos en modo continuo y la estructura de los nombres de los archivos de los últimos tres canales indica que se están grabando los datos en modo *ringbuffer*.

Siguiendo con la figura 4.19, en la *Ventana de mensajes* de la pantalla del programa se presenta en forma de historial algunas de las acciones realizadas en el programa (3). Las acciones presentadas son: el inicio del programa, el nombre de los puertos para los que se configuró un canal y que están adquiriendo datos y el fin de la adquisición de datos.

La figura 4.20 presenta una imagen de la computadora y las unidades sísmicas durante la adquisición y el registro de datos.



Figura 4.20. Sistema Apsis durante la adquisición y el registro de datos.

Al término de la adquisición y el registro de datos, se revisó el contenido de la carpeta de registro de cada uno de los canales configurados. En la carpeta de registro de los canales 1 al 6 se encontraron 11 archivos creados cada 10 minutos y grabados en modo continuo. En la carpeta de registro de los canales 7 al 9 se encontraron 11 archivos numerados, creados cada 10 minutos y grabados en modo *ringbuffer*. En la figura 4.21 se muestra el contenido de las carpetas de registro de los canales 1 y 7. Nótese que el nombre de cada archivo contiene, entre otras cosas, la fecha y la hora de creación del archivo y que

la hora de creación entre los archivos tiene una diferencia exacta de 10 minutos. También, nótese que los primeros diez archivos tienen un tamaño de 235 KB y que el último archivo tiene un tamaño de 69 KB, lo que quiere decir que los primeros diez archivos contienen 10 minutos de datos y que el último archivo contiene menos de 10 minutos de datos, debido a que se detuvo la adquisición.

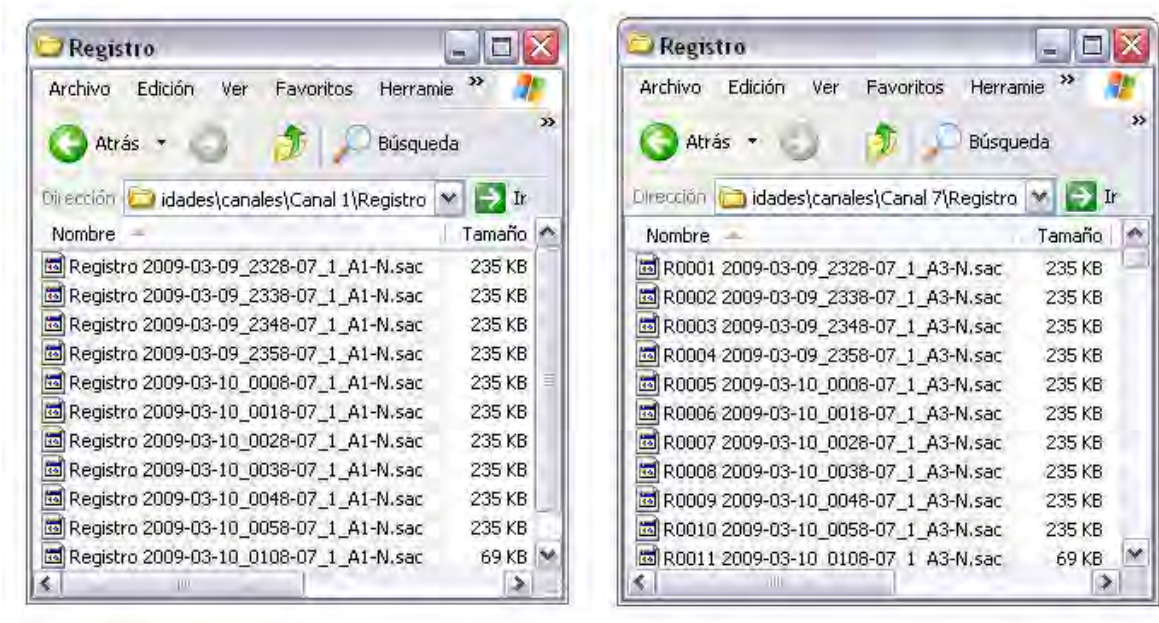


Figura 4.21. Contenido de las carpetas de registro de los canales 1 y 7.

Terminada la revisión del contenido de las carpetas de registro de los canales, se procedió a la lectura de algunos archivos, para lo cual se abrió la ventana *Lectura de archivos*. Como ejemplo, en la figura 4.22 se muestra la apariencia de la ventana *Lectura de archivos*, después de haber leído el primer archivo de la carpeta de registro del canal 1.

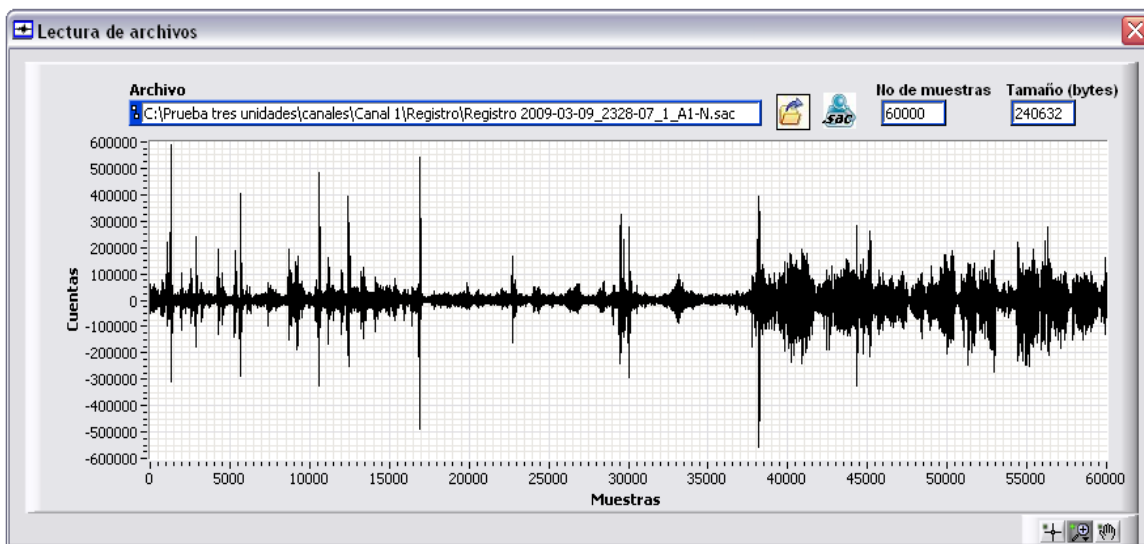


Figura 4.22. Lectura del primer archivo del canal 1.

En la ventana mostrada en la figura 4.22 se observa que el indicador *Archivo* presenta la ruta completa del archivo leído. También se ve en el indicador *No de muestras* que aparece el valor 60000 muestras, a partir del cual se puede demostrar fácilmente que el archivo, cuyos datos fueron tomados a 100 muestras por segundo, contiene la información equivalente a 10 minutos de registro, mediante el siguiente cálculo:

$$60,000 \text{ muestras} \times \frac{1 \text{ segundo}}{100 \text{ muestras}} \times \frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ segundos}} = 10 \text{ minutos}$$

El indicador *Tamaño (bytes)* presenta el valor de 240632 *bytes*, el cual pareciera no ser consistente con el tamaño de 235 KB mostrado en la figura 4.21. Esta variación se debe a que el explorador de Windows presenta un tamaño de archivo cerrado. El tamaño real del archivo se consultó en las propiedades del archivo, en donde se obtuvo el valor de 240632 *bytes*, que si coincide con lo que presenta el indicador *Tamaño (bytes)*.

Al mostrar el encabezado SAC del primer archivo del canal 1 se encontraron los siguientes parámetros (ver figura 4.23):

1. NPTS: éste es el número de puntos y es igual al número de muestras en el archivo (60,000).
2. NVHDR: es la versión actual del encabezado (versión 6).
3. B: es el inicio del archivo en segundos (inicia en el segundo 0).
4. E: es el fin del archivo en segundos (termina a los 600 segundos, que es igual a 10 minutos).
5. IFTYPE: es el tipo de archivo (1 significa series de tiempo).
6. LEVEN: indica si las muestras son igualmente espaciadas (1 significa que las muestras son igualmente espaciadas).
7. DELTA: es el inverso de la frecuencia de muestreo ($1/100 = 0.01$).
8. DEPMIN: es el valor mínimo encontrando en el archivo (-560268). La gráfica de la figura 4.22 da una idea del valor mínimo mostrado en el encabezado.
9. DEPMAX: es el valor máximo encontrando en el archivo (589003). La gráfica de la figura 4.22 da una idea del valor máximo mostrado en el encabezado.
10. NZYEAR: es el año en que se creó el archivo (2009). Este valor es consistente con el año contenido en el nombre del archivo (ver figuras 4.21 y 4.22).
11. NZJDAY: es el día juliano en que se creó el archivo (2454900).

12. NZHOUR: es la hora en que se creó el archivo (23). Este valor es consistente con la hora contenida en el nombre del archivo (ver figuras 4.21 y 4.22).
13. NZMIN: es el minuto en que se creó el archivo (28). Este valor es consistente con el minuto contenido en el nombre del archivo (ver figuras 4.21 y 4.22).
14. NZSEC: es el segundo en que se creó el archivo (7). Este valor es consistente con el segundo contenido en el nombre del archivo (ver figuras 4.21 y 4.22).
15. NZMSEC: es el milisegundo en que se creó el archivo (0).
16. KSTNM: es el código de la estación (A1). Este código es congruente con el establecido en la configuración (ver figura 4.15).
17. KCMPNM: es la componente (N). Este valor es congruente con el establecido en la configuración (ver figura 4.15).

Encabezado SAC

Selecciones de fase				
A	KA	F	KF	
-12345	-12345	-12345	-12345	
T0	T1	T2	T3	T4
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345
T5	T6	T7	T8	T9
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345
KT0	KT1	KT2	KT3	KT4
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345
KT5	KT6	KT7	KT8	KT9
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345

Campos requeridos y de tiempo				
NPTS	NVHDR	B		
60000	6	0		
E	IFTYPE	LEVEN	DELTA	ODELTA
600	1	1	0.01	-12345
IDEP	SCALE	DEPMIN	DEPMAX	DEPMEN
-12345	-12345	-560268	589003	-12345
NZYB	NZJDA	NZHOU	NZM	NZSEC
2009	2454900	23	28	7
NZMSEC	IZTYPE	O	KD	
0	-12345	-12345	-12345	

Campos de la estación				
KNETWK	KSTNM	ISTREG		
-12345	A1	-12345		
STLA	STLO	STEL	STDP	CMPAZ
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345
CMPINC	KCMPN	LPSPOL		
-12345	N	-12345		

Campos del instrumento				
KINST	IINST			
-12345	-12345			
RESP0	RESP1	RESP2	RESP3	RESP4
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345
RESP5	RESP6	RESP7	RESP8	RESP9
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345

Misceláneos				
LCALDA	IGUAL	ISYNTH	KDATRD	
-12345	-12345	-12345	-12345	
USER0	USER1	USER2	USER3	USER4
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345
USER5	USER6	USER7	USER8	USER9
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345
KUSER0	KUSER1	KUSER2	LOVROK	NXSIZE
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345
NYSIZE	XMINIMUM	XMAXIMUM	YMINIMUM	YMAXIMUM
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345

Campos del evento				
KEVNM	IEVREG	EVLA		
-12345	-12345	-12345		
EVLO	EVEL	EVDP	MAG	IMAGTYP
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345
IMAGSRC	IEVTYP	NEVID	NORID	NMFID
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345
KHOLE	DIST	AZ	BAZ	GCARC
-12345	-12345	-12345	-12345	-12345

Cerrar

Figura 4.23. Encabezado SAC del primer archivo del canal 1.

4.2.2. Prueba realizada en campo

La prueba realizada en campo tiene como principal objetivo evaluar el desempeño del programa en la parte de procesamiento, utilizando datos obtenidos con el programa en condiciones reales.

La prueba en campo se llevó a cabo en el área verde que está enfrente de la torre del Instituto de Ingeniería. En esta área se formó un arreglo triangular de 25 m de lado, en cuyos vértices se colocaron tres sensores verticales de velocidad. Estos sensores son de la marca Kinometrics y tienen un periodo de 5 segundos. En la figura 4.24 se puede observar los sensores y la manera en que fueron colocados.



Figura 4.24. Instalación de los sensores sísmicos para la prueba en campo.

Los tres sensores sísmicos se conectaron, mediante cable blindado, a los tres canales de una unidad sísmica SR04. Posteriormente se conectó la unidad sísmica a una computadora portátil, utilizando un cable RS232 y un conversor RS232-USB, y se instaló la antena de su receptor GPS en un lugar despejado para tener una buena recepción. Finalmente, se alimentó la unidad sísmica con una batería de 12 V. El resultado final de la instalación de la unidad sísmica, descrita anteriormente, se puede apreciar en la figura 4.25.



Figura 4.25. Instalación de la unidad sísmica SR04.

Ya con la unidad sísmica en funcionamiento, se abrió el programa y se configuraron tres canales lógicos para adquirir los datos de los tres canales físicos a 100 *sps* y registrarlos en archivos de 30 minutos de duración. La adquisición y el registro de los datos se realizó aproximadamente durante 40 minutos, por lo que se obtuvieron dos archivos para cada canal: un archivo de 30 minutos y un archivo incompleto.

Para el procesamiento con el método SPAC se ejecutó en el programa el asistente de procesamiento. En este asistente se utilizaron como archivos de entrada los archivos de 30 minutos de los tres canales. Al finalizar la ejecución del asistente de procesamiento, se guardaron las imágenes de las gráficas obtenidas en archivos *jpeg* y los datos de la curva de dispersión se guardaron en un archivo de texto. La figura 4.26 muestra la imagen obtenida de las gráficas de los archivos de entrada en el dominio del tiempo. Para obtener esta gráfica, las constantes de los archivos se mantuvieron en 1, excepto la constante del archivo del canal 3, que se estableció en -1, debido a que estaba invertida la polaridad del sensor conectado a este canal. La figura 4.27 muestra la imagen obtenida de la gráfica de los espectros de potencia y la figura 4.28 muestra la imagen obtenida del arreglo de gráficas de los coeficientes de autocorrelación. Para obtener estas dos gráficas, los parámetros que se establecieron para la aplicación del método SPAC fueron: una longitud de ventana de 81.92 segundos, sin traslape, un factor de suavizado de 0.5 y una distancia entre estaciones de 25 m. La figura 4.29 presenta la imagen de la gráfica del coeficiente de autocorrelación promediado. Para el cálculo del coeficiente de autocorrelación promediado se utilizaron los datos de los coeficientes de autocorrelación de las 21 ventanas mostradas en la gráfica de la figura 4.28. Finalmente, la figura 4.30 muestra la imagen de la gráfica de la curva de dispersión de velocidad de fase con sus límites semi-empíricos de confiabilidad.

Todas las gráficas obtenidas durante el procesamiento de los datos fueron observadas y analizadas por un especialista de ingeniería sísmica, quien de acuerdo con su criterio y conocimientos en el área, consideró que los resultados obtenidos fueron los esperados.

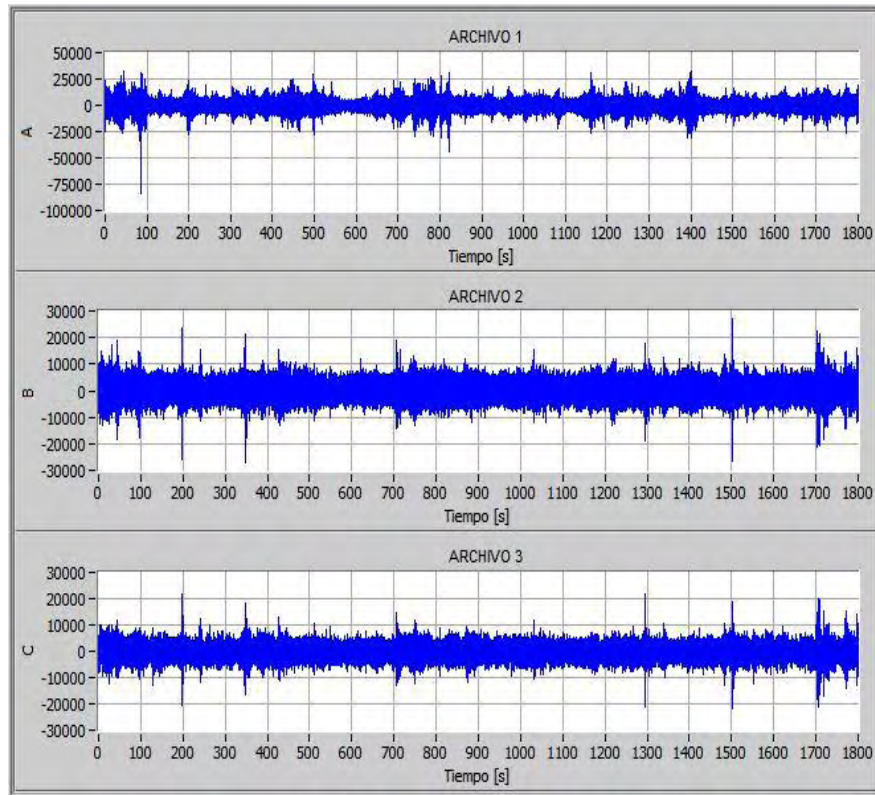


Figura 4.26. Imagen de las gráficas de los archivos de entrada en el dominio del tiempo.

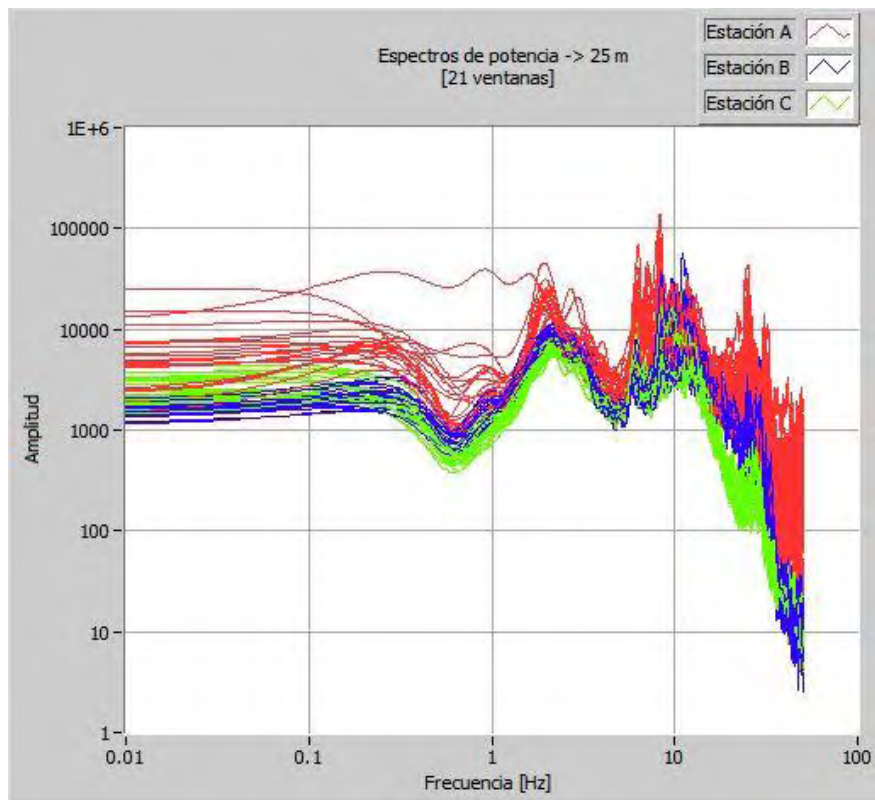


Figura 4.27. Imagen de la gráfica del espectro de potencia.

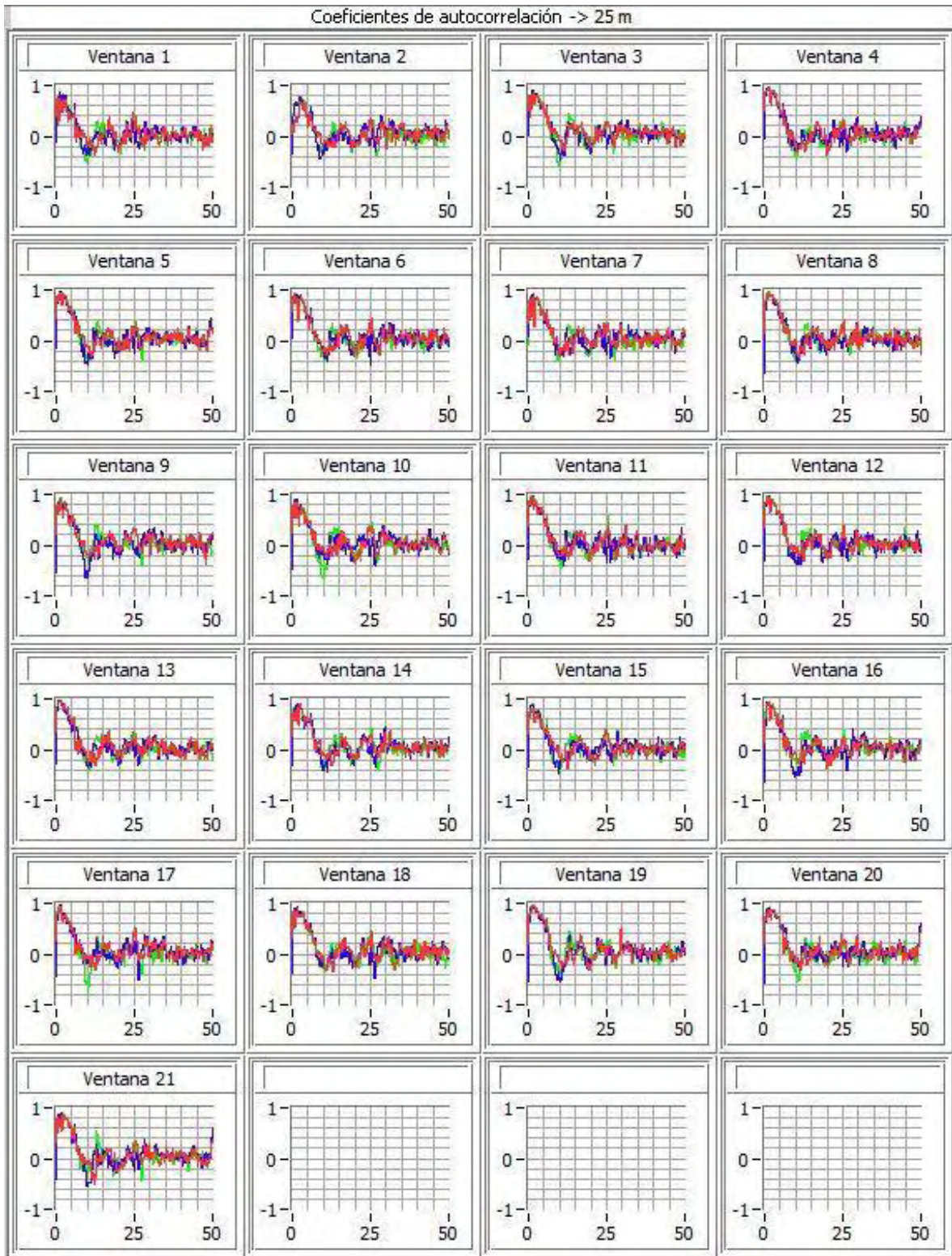


Figura 4.28. Imagen del arreglo de gráficas de los coeficientes de autocorrelación.

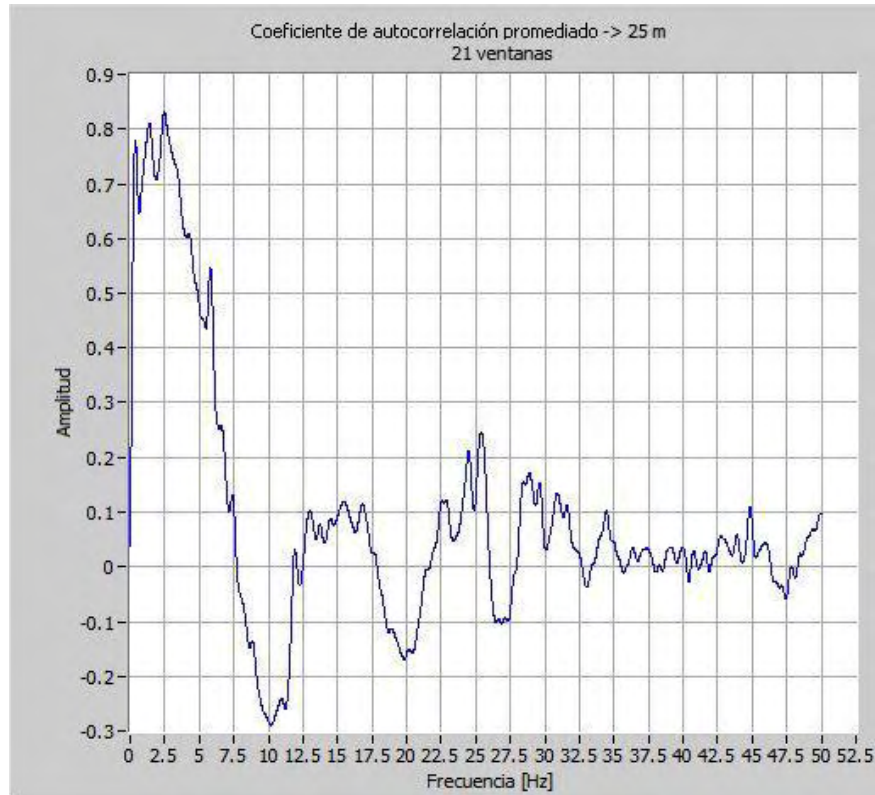


Figura 4.29. Imagen de la gráfica del coeficiente de autocorrelación promediado.

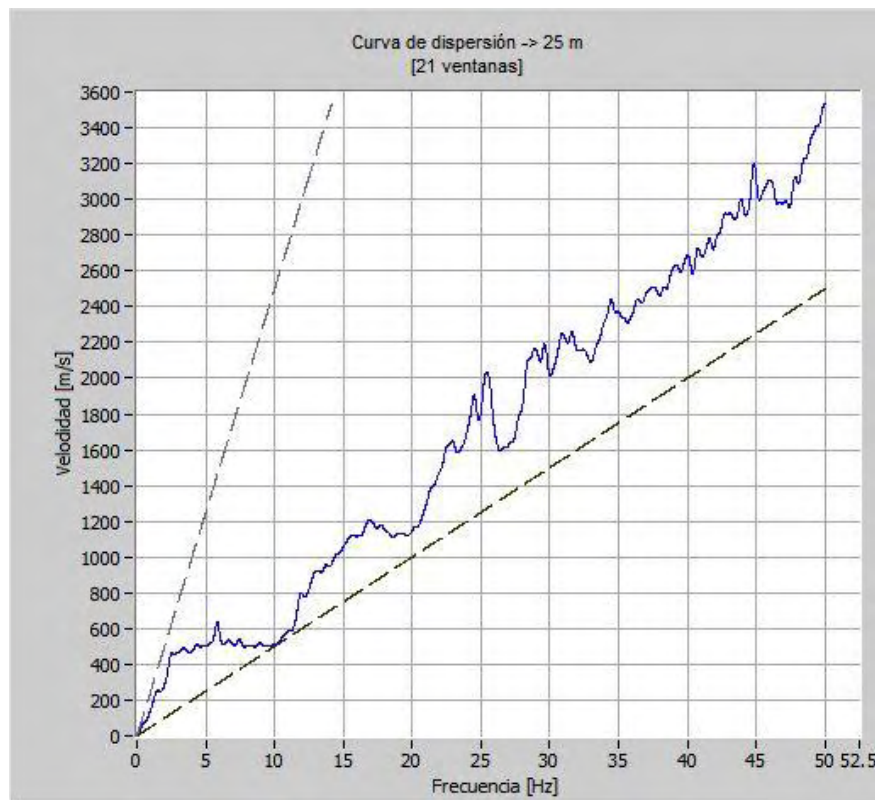


Figura 4.30. Imagen de la gráfica de la curva de dispersión de velocidad de fase.

Para la interpretación de los resultados de la prueba de campo, el especialista en ingeniería sísmica realizó las siguientes acciones:

1. En Matlab abrió el archivo de texto que contenía los datos de la curva de dispersión y con estos datos generó una gráfica. Hizo un acercamiento a una porción de la gráfica de la curva de dispersión que consideró que contenía información útil.
2. A partir de la observación de la porción de la gráfica de la curva de dispersión, propuso un modelo estratigráfico, el cual capturó en un archivo del bloc de notas.
3. En un simulador de Linux para Windows llamado Cygwin corrió un programa en FORTRAN, al cual le ingresó el archivo que contenía el modelo estratigráfico y que dio como resultado un archivo de texto que contenía los datos de la curva de ajuste teórica.
4. En Matlab abrió el archivo de texto que contenía los datos de la curva de ajuste teórica y los graficó junto con la porción de la gráfica de la curva de dispersión que consideró que contenía información útil.
5. Para la primer curva teórica de ajuste graficada no obtuvo un resultado completamente satisfactorio, por lo que volvió a realizar la acciones 2, 3 y 4. Después de ocho intentos obtuvo una curva teórica de ajuste que consideró satisfactoria. En la tabla 4.1 se muestra los parámetros del último modelo estratigráfico que propuso. En esta tabla se observa que para el terreno estudiado se tiene un estrato de 42 metros de espesor que contiene un material de densidad 1.3 ton/m^3 , en donde las ondas S viajan a una velocidad de 530 m/s y las ondas P viajan a una velocidad de 1040 m/s, y se tiene otro estrato que contiene un material de 1.8 ton/m^3 , en donde las ondas S viajan a una velocidad de 900 m/s y las ondas P viajan a una velocidad de 1400 m/s. En la figura 4.31 se muestra la porción de la gráfica de la curva de dispersión, las curvas teóricas generadas en los ocho intentos y la curva teórica generada con el modelo estratigráfico de la tabla 4.1.
6. Tomando los valores del espesor de los estratos y la velocidad de las ondas S y P de la tabla 4.1, se generó en Excel la gráfica de la figura 4.32, la cual muestra la estructura de velocidades en función de la profundidad.

	Espesor [m]	Densidad [ton/m ³]	Vs [m/s]	Vp [m/s]
Estrato 1	42	1.3	530	1040
Estrato 2	-	1.8	900	1400

Tabla 4.1. Modelo estratigráfico que genera la mejor curva teórica de ajuste.

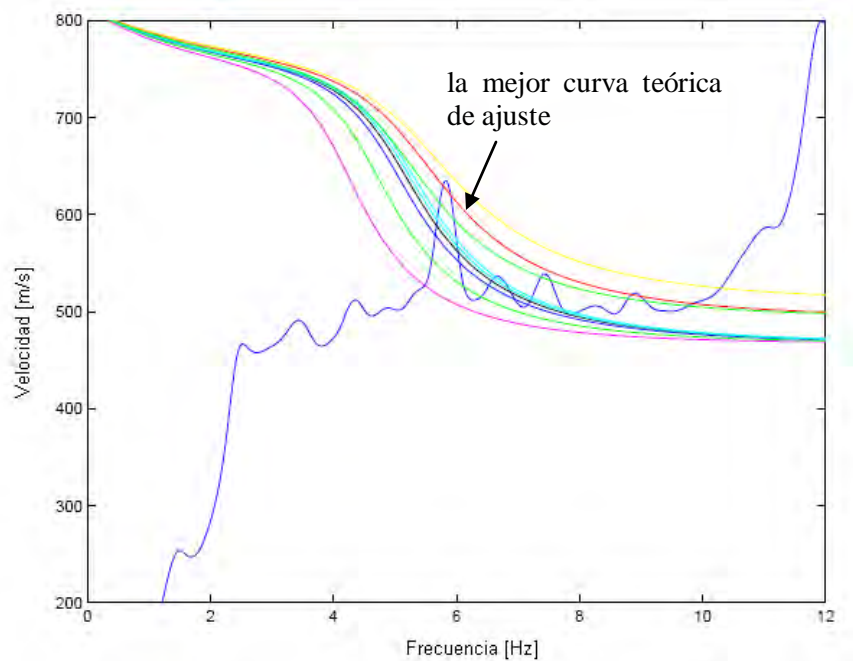


Figura 4.31. Curvas teóricas generadas a partir de los modelos estratigráficos propuestos.

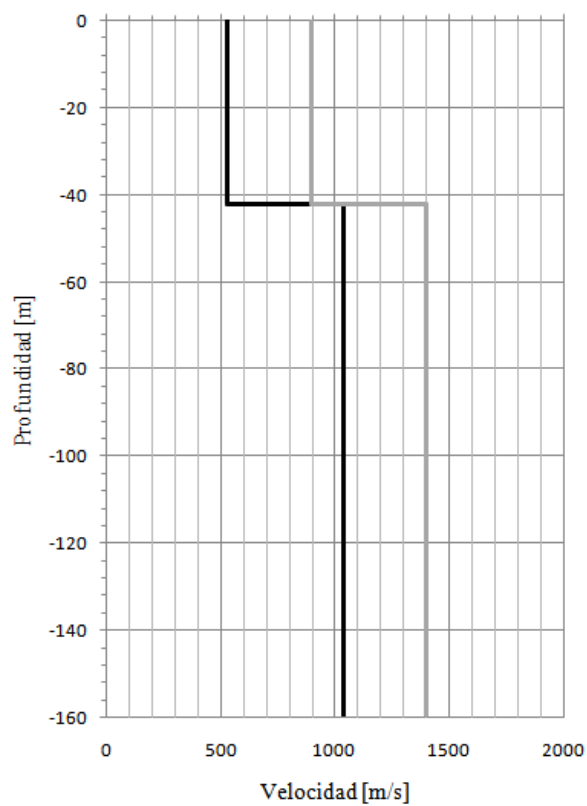


Figura 4.32. Estructura de velocidades para el último modelo propuesto.

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo se comentan los resultados finales a los que se llegaron con el desarrollo del programa de adquisición y procesamiento de datos sísmicos. También se da la conclusión de este trabajo y se establecen varias recomendaciones que podrían mejorarlo.

5.1. Resultados

Los resultados más importantes que se obtuvieron del desarrollo del programa de adquisición y procesamiento de datos provenientes de la unidad sísmica SR04 son los siguientes:

- En cuanto a la interfaz gráfica del programa, se consiguió integrar elementos utilizados comúnmente en el sistema operativo Windows, como son menús, cuadros de diálogo y un asistente, lo cual facilitará al usuario la operación del programa.
- La configuración del programa permite al usuario, por un lado, definir de forma sencilla la ubicación que tendrá la carpeta en donde se almacenarán los archivos resultado de la adquisición de datos, y por otro lado, poder configurar varios canales para establecer, entre otras cosas, la manera en que se registrarán los datos provenientes de una o varias unidades sísmicas.
- En la parte de adquisición y registro de datos, el programa se desarrolló para que fuera de propósito general y no se limitara únicamente a las pruebas que realizan los especialistas del área sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, de manera que este programa puede ser utilizado en otros estudios de ingeniería sísmica que requieran el registro de datos provenientes de una o varias unidades sísmicas simultáneamente, como puede ser la localización de un evento sísmico. En las pruebas hechas al programa se vió que a medida que se conectaron más unidades sísmicas se demandaban más recursos de la computadora. En la prueba realizada para tres unidades sísmicas se observó en el administrador de tareas de Windows que se tenía un uso de CPU del 25% y el uso de memoria RAM fue de 400MB, lo cual indica un buen desempeño debido a que no se demandaron todos los recursos disponibles de la computadora. El número máximo de unidades sísmicas que puede manejar el programa no se pudo estimar directamente debido a la poca disponibilidad de unidades sísmicas.
- El registro de los datos llevado a cabo en el programa se realiza en archivos con formato SAC, lo cual da la posibilidad de compartir la información con un mayor número de miembros de la comunidad científica dedicada a la ingeniería sísmica. En el caso de otros estudios de ingeniería sísmica, la información pueda ser procesada en algunos de los sistemas de procesamiento más comunes en sismología como son SEISAN o SAC2000.

- Se consiguió graficar los datos de los canales de las unidades sísmicas conectadas al mismo tiempo que se realiza la adquisición y el registro de los datos. La gráfica de cada canal tiene la posibilidad de variar sus escalas para poder apreciar las señales sísmicas con mayor claridad.
- Mediante el monitor de estado se hizo posible presentar de forma resumida los parámetros de cada uno de los canales lógicos para que el usuario pueda vigilar la manera en que los canales están operando.
- Con la inserción de una ventana de mensajes se obtuvo un modo inmediato de informar al usuario de las acciones realizadas exitosamente y de algunos errores ocurridos durante la ejecución del programa.
- Un aspecto notable del programa es que se pudo incorporar una opción para realizar la lectura de archivos con formato SAC y presentar en una ventana el contenido del encabezado SAC de una forma sencilla y bien organizada.
- En la parte del procesamiento de datos con el método SPAC, se logró concentrar en un asistente de procesamiento una muy buena parte del trabajo que realizan los especialistas del área sísmica y dar rápidamente un resultado para evaluar en campo la utilidad de los datos registrados. Este asistente abarca todas las funciones que antes se hacían mediante dos programas escritos en FORTRAN, que generaban cinco archivos de texto, para después graficar los datos contenidos en estos archivos utilizando cinco programas en MATLAB. Cabe destacar que la solicitud de los especialistas del área sísmica fue programar la aplicación del método SPAC hasta la generación de la curva de dispersión de velocidad de fase, por lo que para la interpretación de los resultados del procesamiento se debe utilizar un programa en FORTRAN, uno en MATLAB y uno en Excel.
- Con la creación de un programa de instalación se proporcionó un medio para distribuir el programa desarrollado y los controladores necesarios para poder ejecutarlo en cualquier computadora que cuente con el sistema operativo Windows XP o posterior, sin necesidad de que se tenga instalado LabVIEW.

5.2. Conclusiones

De la revisión de las partes que constituyen este trabajo se puede concluir que se cumplió con el objetivo planteado en un principio, que fue crear un programa que permitiera realizar de forma sencilla la adquisición y el procesamiento de datos sísmicos.

Un aspecto importante de mencionar es que la estructura del programa desarrollado no sólo se puede aplicar al área sísmica, sino que constituye un modelo general que se puede aplicar a cualquier sistema que involucre las funciones básicas de un sistema de adquisición de datos: configuración, adquisición, registro, graficado, lectura y análisis de datos.

También cabe destacar que el programa desarrollado contribuirá a realizar pruebas prácticas y económicas para la caracterización del suelo a partir del registro de microtemores. Los resultados de dichas pruebas tendrán una gran utilidad para la evaluación de la respuesta de un sitio a un evento sísmico y la manera en que se puede amplificar el evento, lo cual permitirá a los especialistas en sismología hacer recomendaciones acerca de la construcción en un lugar y en sitios urbanos tomar las previsiones adecuadas.

Por último, personalmente, el desarrollo de este trabajo me dio la oportunidad de incursionar en proyecto de ingeniería en donde tuve la responsabilidad de dar solución a una necesidad utilizando mis conocimientos y la experiencia adquirida sobre la marcha. Este trabajo hizo que me diera cuenta de la gran importancia que tiene la planeación, la administración del tiempo, la interacción con las personas para el enriquecimiento de una idea, la investigación en diversos medios para ampliar las opciones de solución, la adaptación a los cambios y sobre todo la constancia que se debe tener para el desarrollo de un trabajo.

5.3. Recomendaciones

Durante el desarrollo de este trabajo hubo varias revisiones y cambios que ayudaron considerablemente a mejorar el desempeño del programa elaborado, sin embargo, como en todo trabajo siempre hay aspectos que pueden ser mejorados. Las partes del programa que en consenso fueron consideradas susceptibles de cambio o mejora son las siguientes:

- En la parte de la configuración de canales se sugiere aumentar algunas funciones adicionales como puede ser una opción que permita ver la configuración de los canales agregados, la detección automática de los puertos que tengan unidades sísmicas conectadas y la posibilidad de borrar varios canales lógicos a la vez.
- Para la adquisición se recomienda agregar la opción de programar la hora de inicio y fin de la adquisición para evitar que se creen archivos que no se requieran e implementar algún algoritmo que permita la detección de eventos sísmicos y su registro.
- Para la parte de procesamiento aplicando el método SPAC se sugiere agregar algunos controles que hagan posible modificar las escalas de las gráficas mostradas a lo largo del asistente de procesamiento. También, como es de esperarse, se propone adaptar los programas en Fortran, en Matlab y Excel para que sean implementados en el asistente de procesamiento, esto con la intención de poder proponer modelos estratigráficos que permitan estimar de manera más práctica la estructura de velocidades en función de la profundidad de las capas superficiales del suelo.
- Se plantea incluir en una opción de menú un archivo de ayuda en donde se pueda consultar inmediatamente el manual de operación del programa.

BIBLIOGRAFÍA

Libros:

- Aki Keiiti, Richards Paul, *Quantitative seismology – theory and methods*, Freeman and Company, 1980.
- Bormann Peter, Berkman Erik, *New manual of seismological observatory practice*, 2002.
- Bitter Rick, Mohiuddin Taqi, Nawrocki Matt, *LabVIEW Advanced programming techniques*, segunda edición, CRC press, 2007.
- Downing Douglas, Covington Michael, *Dictionary of computer and internet terms*, Barron's, 2000.
- Havskov Jens, Alguacil Gerardo, *Instrumentation in earthquake seismology*, versión preliminar, junio 2002.
- Kernighan Brian W., Ritchie Dennis M., *El lenguaje de programación C*, segunda edición, Pearson Prentice Hall, México, 1991.
- Lázaro Antoni Manuel, Del Rio Joaquín, *LabVIEW 7.1 Programación gráfica para el control de instrumentación*, Thomson, 2005.
- Lee William, et, al, *International handbook of earthquake & engineering seismology*, parte A, Academic Press, p. 284-287.
- Proakis John G., Manolakis Dimitris G., *Digital signal processing principles, algoritms and applications*, tercera edición, Prentice-Hall international, 1996.

Artículos y tesis:

- Aguirre Jorge, et, al, *Informe de la aplicación del método SPAC en el fraccionamiento villa frontera de la ciudad de Puebla*, 2008, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Cuadra Pilar, *Aplicación de microtemores y vibraciones naturales: análisis de microtemores y vibraciones naturales para la caracterización de sitio*, Tesis de licenciatura, Universidad Simón Bolívar, 2007.

- Flores-Estrella Hortencia, Aguirre Jorge, *SPAC: An alternative method to estimate earthquake site effects in Mexico city*, Geofísica internacional (2003), Vol. 42, No 2, p. 227-236.
- Flores-Estrella Hortencia, Lomnitz-Aronsfrau Cinna, Yumssim-Guarneros Sergio, *Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemores con el método SPAC*, Geos, Vol. 24, No 3, p.438-445.
- Yauri Sheila, *Microtemores*, Compendio de trabajos de investigación (2006), Instituto geofísico del Perú, Vol. 7, p. 43-56.

Manuales:

- National Instruments Corporation, *Development Guidelines*, 2003.
- National Instruments Corporation, *LabVIEW Fundamentals*, 2007.
- National Instruments Corporation, *Serial quick guide reference*, 2004.
- Savage Brian, Goldstein Peter, Snoke Arthur, *SAC manual and tutorial*, Lawrence-Livermore Laboratory, University of California.

Páginas de internet:

- www.fortran.com/
- www.greenwichmeantime.com/
- www.iris.edu/manuals/sac/manual.html
- www.ni.com
- www.ptb.de/en/org/4/44/442/dcf77_1_e.htm
- www.sara.pg.it/sara_en.html
- www.wikipedia.org/