



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA
DE MÉXICO

54

FACULTAD DE INGENIERÍA

289216

“SISTEMA DE PROCESAMIENTO DE
ACELEROGRAMAS EN
COMPUTADORA PC”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN COMPUTACIÓN

P R E S E N T A :
ANA LAURA RUIZ GORDILLO



DIRECTOR DE TESIS:
M. I. LEONARDO ALCÁNTARA NOLASCO

MÉXICO, DISTRITO FEDERAL, 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Agradecimientos

Son muchos a quienes tengo que agradecer por compartir sus conocimientos conmigo, por su confianza y apoyo o sencillamente por su amistad. Pero quiero agradecer muy especialmente ...

- *A Dios, por todo*
- *A mis padres que con su fortaleza y ternura han sido mi mejor ejemplo y guía*
- *A mi abue por haber ocupado mi lugar de madre en mis días de clase*
- *A mis hermanos porque entre risas y disgustos no permitieron que cesara en el intento, particularmente a Martín, mi amor*
- *A mi esposo por su amor y por estar siempre a mi lado y*
- *A mi hijo por ser mi principal motivo*

Quiero agradecer también al M.I. Leonardo Alcántara por su confianza y al M.I. Marco A. Macías por su apoyo académico siempre oportuno.



Índice

	pág.
1. INTRODUCCIÓN	1
2. DISEÑO DEL SISTEMA DE PROCESO	8
2.1 Antecedentes	9
2.2 Diseño de ProAcel	12
2.2.1 Análisis de requisitos	12
2.2.1.1 Archivos de ProAcel	16
2.2.2 Metodología	31
2.2.2.1 Conceptos	32
3. RUTINAS BÁSICAS	42
3.1 Lectura y conversión de datos	43
3.2 Graficación	46
3.3 Tareas de apoyo	50
4. ANÁLISIS DE FOURIER	55
4.1 Serie de Fourier	56
4.2 Transformada de Fourier	57
4.3 Transformada Discreta de Fourier	59
4.4 Transformada Rápida de Fourier	60
4.5 Filtrado del espectro de Fourier	71
4.6 Graficación	75
4.7 Cocientes espectrales	76
5. CORRECCIÓN DE ACELEROGRAMAS	80
5.1 Método de CALTECH	81
5.2 Cálculo de velocidades y desplazamientos	85
5.3 Espectro de respuesta	89
6. CONCLUSIONES	92
REFERENCIAS	

Capítulo 1

Introducción

1. INTRODUCCIÓN

A través del tiempo, los temblores han sido, y seguirán siendo, uno de los fenómenos naturales más espectaculares que ha presenciado el hombre. El peligro que implica la ocurrencia de un temblor involucra tanto la pérdida de vidas humanas, como las alteraciones ocasionadas en la organización social y las destrucciones materiales en zonas de muy alta densidad de población. Es por esto, que en nuestro país, el estudio y conocimiento de las causas y efectos de los fenómenos sísmicos así como la mitigación de sus consecuencias han cobrado gran interés.

Un temblor puede definirse como una vibración o movimiento del suelo que puede ser producido por diferentes causas como el colapso del techo de cavernas y minas, el choque de objetos pesados contra la superficie, las erupciones volcánicas, explosiones, deslizamiento de taludes en montañas y otras (Ref. 1); no obstante y debido a la gran intensidad que pueden tener, los de mayor importancia son los producidos por el acomodamiento de la corteza terrestre, y son conocidos como de origen tectónico. El registro continuo de estos eventos hizo evidente que suceden repetidamente sobre regiones angostas de gran longitud, de las cuales el ejemplo más claro quizá sea el Cinturón de Fuego del Pacífico, que comprende las costas americana y asiática del Océano Pacífico. Sin embargo no había sido posible justificar este hecho, y fue hasta finales de los años setenta que se pudo dar una explicación racional y bien fundamentada, basándose en la teoría de *Tectónica de Placas*. En términos simples, esta mostró que la capa más superficial de la tierra está formada por una serie de placas rígidas que se desplazan sobre un estrato de material viscoso llamado astenósfera. Las placas, de aproximadamente 100 km. de espesor, varían en tamaño desde la enorme del Pacífico hasta otras más pequeñas como la de Rivera, frente a las costas de Jalisco (Ref. 2). Su movimiento puede ser por: 1) separación, lo que provoca que se forme nueva corteza al enfriarse el material que emerge a la superficie, 2) subducción que es cuando una de las placas penetra por abajo de la otra, y 3) desplazamiento lateral, como ocurre en la conocida falla de San Andrés en California (Ref. 3). Independientemente de la forma del movimiento, durante su ocurrencia se generan fuerzas de fricción que propician la acumulación de energía, cuando ésta supera a las fuerzas de fricción, es liberada violentamente produciendo el fenómeno conocido como temblor y la energía es irradiada en todas direcciones en forma de ondas sísmicas que se propagan por los diferentes estratos.

En el mundo existen principalmente dos zonas donde la actividad sísmica es muy frecuente: el Cinturón Alpino y el Cinturón Circumpacífico. La primera se propaga desde las Azores -al extremo occidental de Europa y África- cruzando el Mediterráneo, afectando principalmente a la Península Ibérica, el norte de África, Italia, Grecia, Rumania, Yugoslavia, Irán, Irak, Turquía, y siguiendo por Indonesia y Nueva Guinea (Fig. 1).

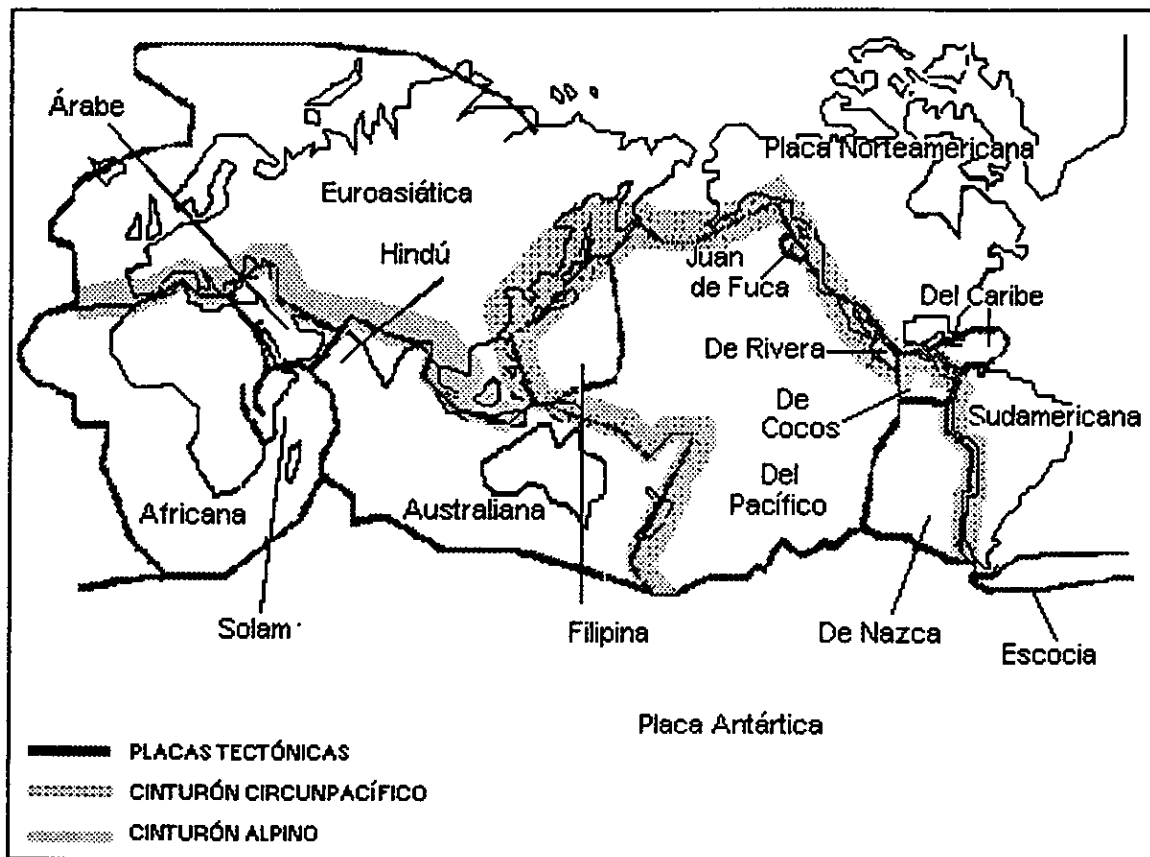


Fig. 1. Distribución de las Placas Tectónicas.

El Cinturón Circunpácífico es relativamente angosto y se localiza alrededor del Océano Pacífico, abarcando desde el extremo sur de América, pasando por Chile, Perú, Ecuador, Colombia, América Central, México, Estados Unidos, Canadá y Alaska, para continuarse después hacia el Japón y las islas Filipinas y terminar en Nueva Zelanda. En esta región se libera anualmente del 80 al 90 por ciento de la energía sísmica mundial.

Con relación a México, se pueden señalar tres zonas como fuentes potenciales de generación de sismos, el área Noroeste en donde se ubica la falla de San Andrés, la región del eje neovolcánico y la denominada Zona de Subducción Mexicana que se localiza a lo largo de las costas de Jalisco hasta la frontera con Guatemala. Esta última presenta un elevado índice de sismicidad y además tiene el suficiente potencial para generar sismos de gran intensidad en períodos relativamente cortos que pueden poner en peligro importantes núcleos de población.

En nuestro país el registro de la actividad sísmica se inicia a principios del siglo XX y es

en 1910 cuando se crea el Servicio Sismológico Nacional (SSN) con el principal objetivo de localizar y establecer la magnitud de los eventos sísmicos generados en territorio nacional. Para tal efecto se instaló una red constituida por sismógrafos, los cuales están integrados por péndulos fuertemente amortiguados y cuya relación masa-rigidez es muy grande. Estos instrumentos permiten obtener un senso continuo de los movimientos producidos durante la ocurrencia de cualquier evento. El registro obtenido, llamado sismograma, tiene diversas aplicaciones entre las cuales se pueden señalar la localización del sismo, el estudio de los efectos en la fuente y la determinación de la trayectoria de las ondas.

No obstante que la red sismológica nacional con el transcurso del tiempo, se ha ido modernizando y expandiendo para tener una mejor cobertura de la sismicidad, la información por ella generada no permite en muchos casos hacer estudios sobre los efectos sísmicos locales en zonas que potencialmente pueden generar un temblor de gran intensidad en un período corto o en áreas y ciudades expuestas a un peligro sísmico alto. Por tal razón, ha sido necesario complementarla con redes acelerográficas, que como su nombre lo indica utilizan acelerógrafos para el registro de los movimientos. En este caso, los aparatos también están dotados de péndulos fuertemente amortiguados, pero con una relación masa-rigidez pequeña. Por el contrario de los sismógrafos estos equipos tienen dispositivos especiales de arranque que los activan cuando la amplitud del movimiento alcanza un nivel predeterminado. Su registro, denominado acelerograma, permite ejecutar estudios relacionados con: propagación de ondas, efectos de sitio, respuesta dinámica de estructuras, etc.

La instalación de la red acelerográfica nacional se remonta a principios de los años sesenta cuando fueron puestos en operación los dos primeros equipos; actualmente, la cantidad y tipo de estaciones así como su ubicación en zonas de alto riesgo sísmico hacen de México uno de los países mejor instrumentados (Fig. 2).

Estos sistemas de medición y la información que han generado han sido fundamentales para la investigación y el desarrollo de la sismología e ingeniería sísmica. La instalación, expansión y operación de la red la han realizado principalmente los siguientes organismos: el Instituto de Ingeniería, UNAM (Idel), el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), la Comisión Federal de Electricidad (CFE), el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES), la Fundación ICA (FICA), el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), la Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica (RIIS) y el Instituto de Geofísica, UNAM (IdeG).

A raíz de los temblores de septiembre de 1985 (Ref. 4, 5, 6 y 7), se ha producido un cambio tanto cuantitativo como cualitativo en la instrumentación sísmica, de tal manera que las instituciones involucradas han incorporado a sus redes mejores instrumentos de amplia escala dinámica, con mayor resolución y amplia respuesta en frecuencia; además de incluir las nuevas tecnologías de registro y almacenamiento de datos. Hoy en día, la Red Acelerográfica Nacional cuenta con aproximadamente 500 estaciones y del orden de 11000 acelerogramas de tres componentes (Ref. 8).



Fig. 2. Red Acelerográfica de México.

Con el propósito de difundir y manejar eficientemente este enorme acervo sísmico se consideró necesario estandarizar los archivos de aceleración para contar con un formato único que facilite su captura, almacenamiento, procesamiento y distribución, además de integrarlos en una base nacional de datos, por lo cual en 1992 se acordó iniciar el proyecto de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes (BMDSF) (Ref. 9, 10, 11 y 12) cuya estructura se muestra en la figura 3.

Como puede observarse del diagrama, la BMDSF está integrada por 4 bases de datos que contienen información acerca de: 1) las redes, estaciones e instrumentación; 2) información sobre los sismos registrados; 3) sobre los acelerogramas y 4) todos los archivos de aceleración reprocesados y convertidos a un formato estándar. Los tres primeros bancos de datos son controlados por un sistema manejador diseñado especialmente para capturar, ordenar, editar, almacenar y desplegar en pantalla e imprimir los datos. La base número 4, que contiene los datos estándar de aceleración, está asociada a un manejador de archivos con algunas utilerías de apoyo que permiten la edición, búsqueda y ordenamiento de los mismos, así como el despliegue numérico y gráfico de datos. Forma parte también del sistema un conjunto de programas para

convertir los archivos nativos¹ de aceleración al formato estándar.

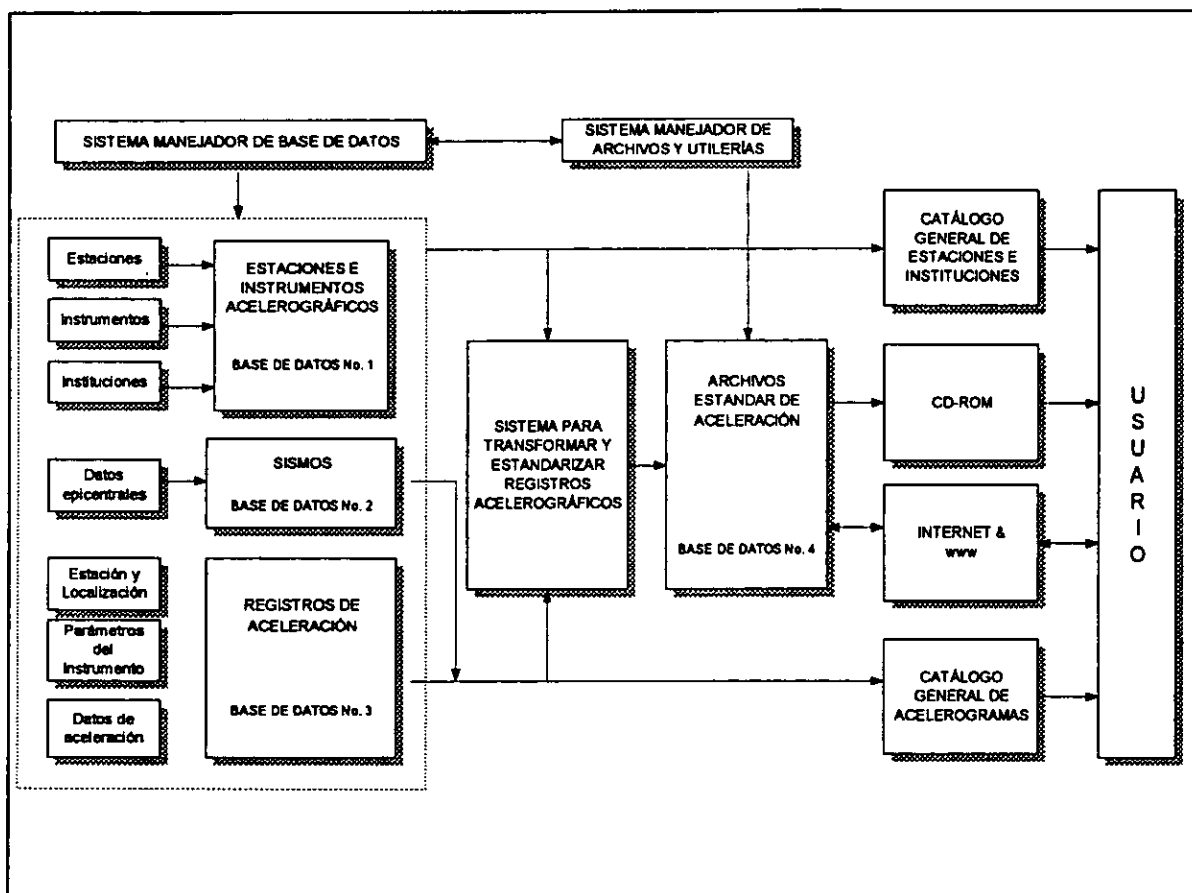


Fig. 3. Diagrama general de bloques de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes.

Los objetivos de la BMDSF son:

- Identificar a las instituciones que operan y mantienen redes acelerográficas
- Hacer un inventario de las estaciones y acelerógrafos existentes en el país
- Compilar todos los acelerogramas obtenidos
- Recopilar la información de los sismos que han producido registros acelerográficos

¹ Un archivo nativo es el que tiene el formato de datos propio del aparato de registro.

- Convertir a un formato único los registros acelerográficos
- Crear un gran banco de datos con las series de tiempo-aceleración
- Difundir entre profesionistas, investigadores y estudiantes la información registrada utilizando para ello los medios impresos, de disco compacto y la red Internet

El formato único para los archivos de acelerogramas que se maneja es conocido como *Archivo Estándar de Aceleración versión 2.0 (ASA 2.0)*. Este es un archivo autoexplicativo tipo ASCII, lo que permite que pueda ser editado fácilmente. Está integrado por una sección para el encabezado y otra para los datos numéricos de aceleración.

En la actualidad, no existe en México un sistema para el proceso estándar de acelerogramas que considere como plataforma de desarrollo los alcances planteados por el grupo de la BMDSF. Por tal motivo, el trabajo de esta tesis tiene como principal objetivo el diseño e implementación de un sistema de procesamiento de acelerogramas, bajo los siguientes requerimientos:

- Sea un producto acorde a la plataforma de desarrollo del grupo de la BMDSF
- Sea interactivo y permita un análisis rápido de la información
- Sea sencillo, de manera tal que personas con escasos conocimientos en cómputo y sismología puedan emplearlo sin dificultad
- Permita desarrollar las tareas básicas de proceso como son: lectura y conversión de datos, integración, cálculo de espectros, graficación, etc.

En el capítulo 2 del presente trabajo, se describen los antecedentes del procesamiento de acelerogramas en el Idel, el diseño del sistema ProAcel y los archivos que emplea. En el 3 se tratan las rutinas de lectura y conversión de datos, graficación y tareas de apoyo tales como la generación de reportes y otras. Los algoritmos utilizados en el cálculo de los espectros de Fourier y de los cocientes espectrales, así como su graficación son tratados en el 4. El 5 presenta el Método de Corrección de Caltech, la obtención de velocidades y desplazamientos y los espectros de respuesta. Finalmente, el capítulo 6 contiene los resultados y conclusiones.

Capítulo 2

Diseño del Sistema de Proceso

2. DISEÑO DEL SISTEMA DE PROCESO

2.1 Antecedentes.

En nuestro país, el registro de temblores intensos se remonta al año de 1960 cuando se instalaron los dos primeros acelerógrafos. Desde entonces, se ha empleado una gran diversidad de aparatos de registro de temblores fuertes que pueden clasificarse dentro de dos grandes categorías: los de tipo analógico y los digitales. Cada tipo, e incluso cada modelo de aparato, cuenta con elementos de almacenamiento, formato de datos y programas propios que definen la forma en que la información del acelerógrafo será transferida a un archivo de computadora.

Para los acelerógrafos analógicos, el dispositivo de almacenamiento puede ser una película fotográfica de 70 mm, o bien, papel fotográfico. En ambos casos es necesario pasar del trazo continuo de tiempo-aceleración a datos digitales que puedan ser procesados en una computadora. En cuanto a los equipos digitales, pueden almacenar la información en cinta magnética, o en memoria de estado sólido. En el primer caso, el cassette recolectado debe reproducirse a través de una unidad lectora especial que envía la información a la computadora, mientras que en el segundo, la información se trasfiere a esta directamente desde la memoria del acelerógrafo. Una vez que los datos han sido llevados a un archivo, se prosigue con su procesamiento, entendiendo por este la obtención de parámetros que caracterizan al movimiento registrado, tales como la aceleración, la velocidad y el desplazamiento máximos, duración de la parte intensa del temblor, frecuencias dominantes del movimiento y espectros de respuesta entre otros.

En el caso particular del Idel, inicialmente el procesamiento de acelerogramas se llevaba a cabo mediante un programa conocido como SERIE/TIEMPO que era ejecutado en la computadora B-6700 del Centro de Servicios de Cómputo de la UNAM (Ref. 13). Más adelante, los avances en los campos de la electrónica y la computación dieron lugar a la aparición, por una parte, de acelerógrafos con nuevas y mejores tecnologías de registro y almacenamiento, y por otra, de computadoras más veloces y con mayor capacidad de memoria, lo que propició el desarrollo de sistemas de procesamiento más poderosos, tales como los denominados TERRE y SPA01.

El TERRE era ejecutado en un equipo de cómputo PRIME MK-II instalado y operado en el propio Idel, y su principal característica consistía en su capacidad de almacenar en memoria y procesar hasta cuatro señales simultáneamente, cada una de 10000 muestras como máximo, y en el caso específico de la Transformada de Fourier de hasta 16384 muestras (Ref. 14). En cuanto al SPA01, está integrado por un conjunto de programas independientes para PC con capacidad para manejar señales de 7500 puntos como máximo, lo que equivale a 75 segundos considerando una tasa de 100 muestras por segundo (mps) y que deben además estar contenidas en un archivo con formato especial llamado TERRE. Por señal se entiende el conjunto de datos correspondientes a

cada uno de los canales que puede registrar un acelerógrafo, de modo que para un evento determinado, en el caso del SPA01, existen tantos archivos de datos como canales de registro tenga el aparato, y, para completar el procesamiento de acelerogramas es necesario ejecutar cada uno de los programas que lo conforman según se muestra en la figura 4 y que se describen brevemente a continuación.

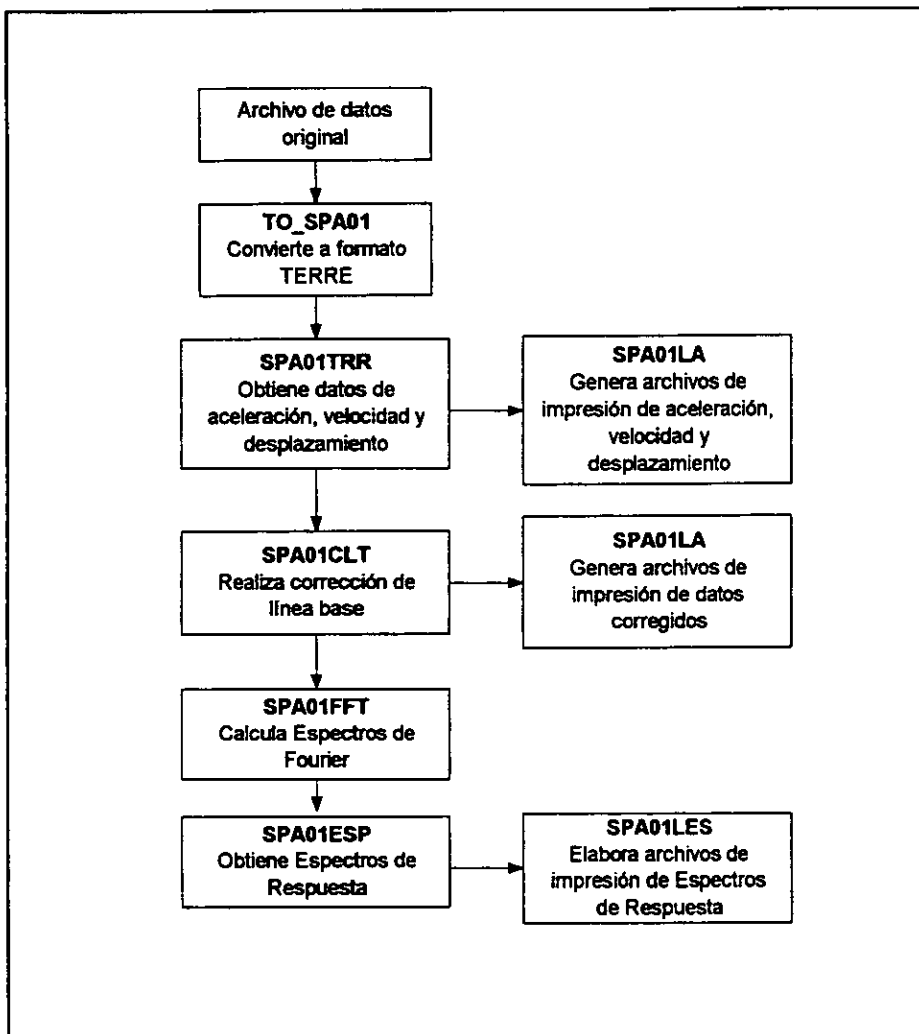


Fig. 4. Procesamiento de datos con el SPA01.

- TO_SPA01. Se emplea para convertir los diferentes formatos de archivos de datos en el estándar empleado por el SPA01.

- SPA01TRR. Ejecuta operaciones básicas como restar la media, multiplicar los datos de aceleración por un factor, integración, interpolación, etc.
- SPA01CLT. Realiza corrección de línea base, corrección instrumental e integración con el fin de obtener aceleración, velocidad y desplazamiento corregidos.
- SPA01FFT. Se encarga del cálculo de la Transformada Rápida de Fourier y, si el usuario lo requiere, del suavizado de la misma.
- SPA01ESP. Permite calcular los espectros de respuesta para 5 amortiguamientos y hasta 98 períodos preestablecidos o para los que el usuario requiera.
- SPA01FAR. Calcula la función de amplificación relativa entre dos acelerogramas.
- SPA01LA. Genera los archivos para impresión de los resultados de tiempo, aceleración, velocidad y desplazamiento.
- SPA01LES. Crea los archivos para impresión de los espectros de respuesta (Ref. 15).

A raíz de los temblores de septiembre de 1985, la instrumentación sísmica en nuestro país ha evolucionado notablemente, la incorporación de más y mejores instrumentos de registro a la Red Acelerográfica Mexicana ha dado como resultado un incremento en el número, la calidad y el tamaño de los acelerogramas obtenidos. Hoy en día la red de acelerógrafos en México está integrada por más de 500 estaciones de registro y se han obtenido, hoy en día, cerca de 14,000 acelerogramas (Fig. 5), lo anterior si bien es una situación deseable para el avance en el conocimiento del fenómeno sísmico también nos impone el reto de desarrollar nuevas herramientas con las cuales podamos analizar, aunque en forma preliminar, la información generada durante un evento sísmico. Por otro lado, tampoco hay que olvidar que el desarrollo de las nuevas tecnologías nos permiten obtener registros que antes hubiese sido utópico considerar, por ejemplo actualmente podemos registrar eventos de larga duración (500 s) a tasas de 250 mps lo que implica considerar acelerogramas de 125,000 muestras por canal; adicionalmente, si consideramos que la instrumentación de un edificio, en la ciudad de México, podría estar integrada por 30 canales esto da una idea de la vasta cantidad de información que será necesario procesar después de la ocurrencia de un sismo. Lo anterior, estableció la necesidad de contar con un sistema propio y acorde a las necesidades nacionales y que fuera parte integral del sistema de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes, por ello se desarrolló el Sistema ProAcel que se describe en el presente trabajo.

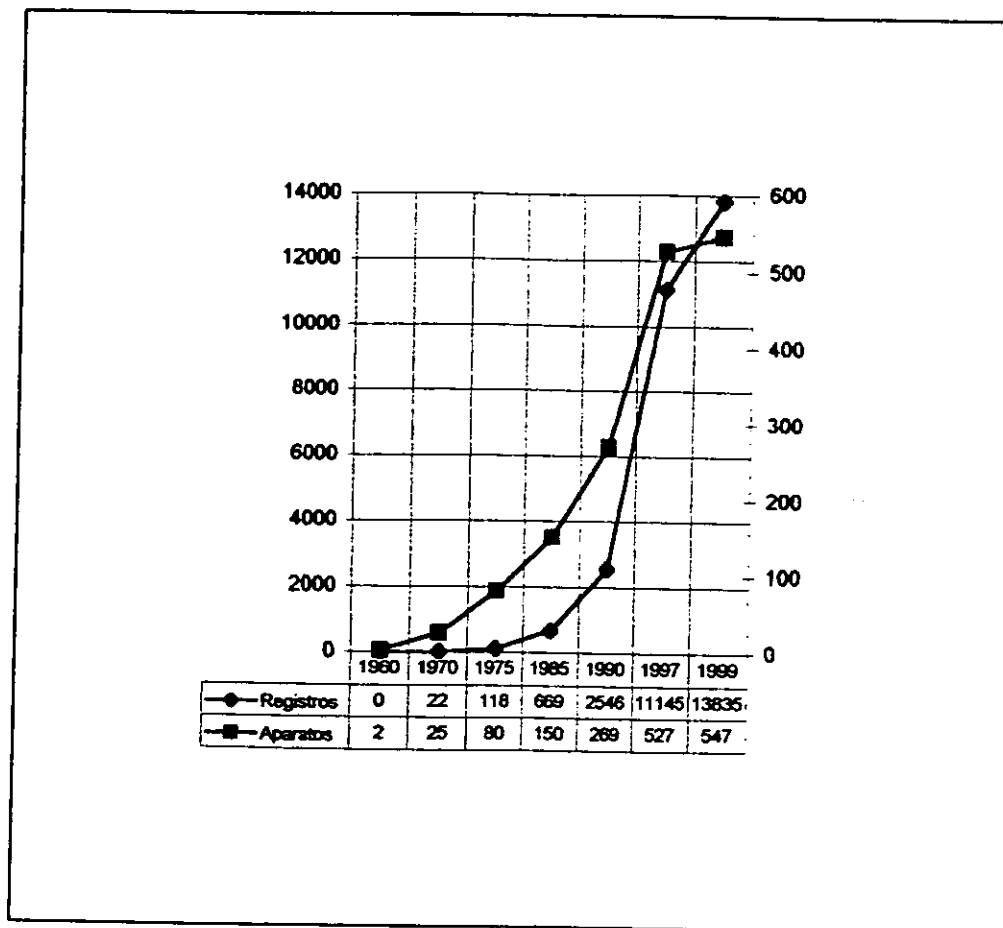


Fig. 5. Crecimiento de la red y el acervo acelerográfico en México

2.2 Diseño de ProAcel.

2.2.1 Análisis de requisitos.

Independientemente de la metodología de desarrollo que se aplique, para que este sea exitoso, es esencial una comprensión total de los objetivos que debe cumplir el software. El análisis de requisitos es la primera fase técnica del desarrollo en la cual se descubren y especifican las tareas que debe realizar el sistema y se basa principalmente en la comunicación entre el cliente y el desarrollador. Aunque en apariencia esta etapa pueda parecer simple, se enfrenta a situaciones como la ambigüedad, las malas interpretaciones, que el cliente no esté seguro de lo que desea, que el programador no confíe plenamente en la eficacia de algún algoritmo, etc. Existen varias alternativas para realizar un análisis de requisitos eficiente. En el caso de ProAcel se empleó la técnica

conocida como construcción de prototipos o prototipado. La construcción de prototipos se inicia con la recopilación de requisitos, (el desarrollador y el cliente encuentran y definen los objetivos generales del programa), se continúa con la realización de un diseño rápido y finalmente se construye un prototipo² que es evaluado por el cliente/usuario, permitiendo refinar los requisitos. El prototipo creado puede ser desechable o evolutivo. En el primer caso, sirve únicamente para mostrar los requisitos y después se desecha, en el segundo, el prototipo es una primera versión que va evolucionando hasta llegar al sistema terminado. Una condición para que la creación del prototipo de software sea efectivo, es que debe desarrollarse rápidamente para que el cliente pueda valorar los resultados y recomendar los cambios oportunamente.

A grandes rasgos, el objetivo fundamental de ProAcel es el de realizar tareas básicas del procesamiento de acelerogramas, tales como obtención de velocidades y desplazamientos, cálculo de espectros de Fourier y cocientes espectrales entre otras, brindando al usuario los resultados en forma clara y concisa, permitiendo con ello analizar, preliminarmente, la información originada por un temblor. Además, el sistema debe ser congruente con el estándar propuesto por la BMDSF y de fácil empleo y divulgación. Para satisfacer este último requisito, se decidió que ProAcel se desarrollara para una plataforma de PC bajo ambiente Windows debido, en gran medida, a la popularidad y facilidad de uso tanto de las computadoras personales como del ambiente Windows. Una aplicación consistente con las formas y estándares de Windows, a diferencia de un programa para DOS, presenta todas las opciones posibles en una o más ventanas, de tal manera que el usuario pueda elegir una de ellas. En este caso, el programador no puede saber la secuencia en la que van a ejecutarse las sentencias del programa. El resultado es que hay que escribir código separado para cada opción en general, quedando la aplicación dividida en pequeñas funciones que se ejecutan como respuesta a la ocurrencia de un suceso determinado, entendiendo por este una acción reconocida por una ventana o control, y que puede ser causado por el usuario (pulsar una tecla), por el sistema (trascurre un determinado tiempo) o por el código (se carga una ventana). En Windows cada ventana y cada control tienen predefinidos un conjunto de sucesos. Cuando uno de ellos ocurre, Windows manda un mensaje al objeto apropiado el cual ejecuta la función asociada para ese suceso en particular, y una vez procesado el mensaje, el control es devuelto a Windows (Fig. 6).

² Un prototipo es un ejemplar o modelo de una maquinaria, vehículo, software, etc., construido con la finalidad de experimentar en funcionamiento sus características, con vistas a la construcción en serie.

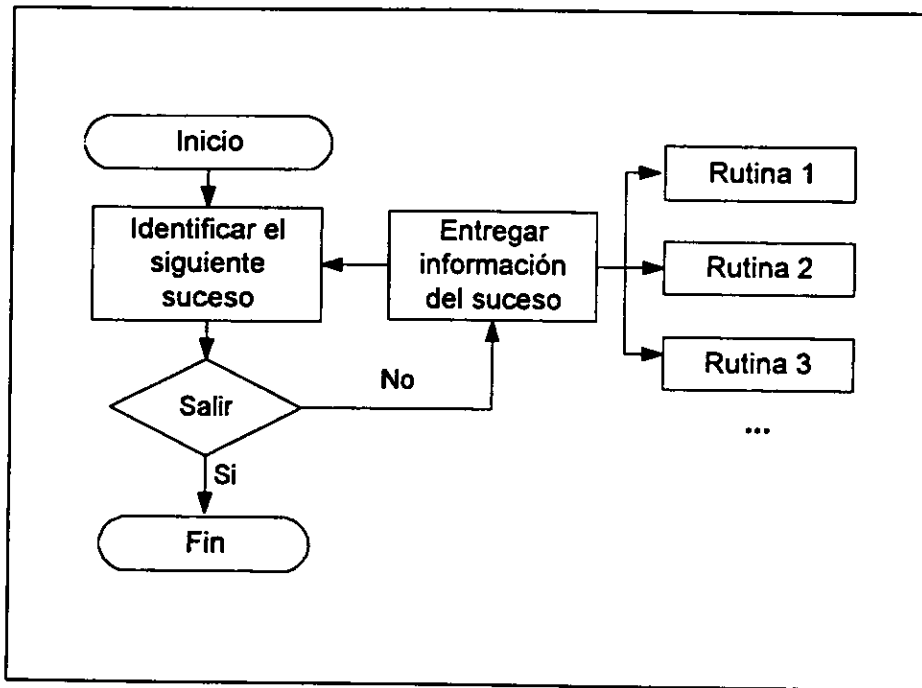


Fig. 6. Funcionamiento de una aplicación Windows típica.

Si bien las aplicaciones Windows son fáciles de usar, su implementación no es cosa trivial. Para facilitar el trabajo, y tomando en cuenta que el análisis de requisitos se realizaría por medio de la creación de prototipos, se seleccionó como herramienta de desarrollo el Microsoft Visual C++ que permite programar aplicaciones para Windows en forma visual. El concepto es sencillo, el programador define gráficamente los elementos que deberán aparecer sobre la interfaz de usuario del programa (menús, ventanas, botones, etc.) y mediante la modificación de las propiedades de cada uno de ellos, define las operaciones que deberán realizar dentro del programa. Una vez finalizado el proceso, la herramienta se encargará de crear todo el código que sea necesario para que las cosas se ejecuten de la forma en que se ha definido en pantalla. Ya que se ha generado este código, se debe recurrir a la programación tradicional para que el sistema en su totalidad realice las tareas específicas para las que se creó. La versión usada (1.5) permite generar aplicaciones de 16 bits que pueden ser ejecutadas en Windows de 16 bits (Windows for Workgroups 3.11 por ejemplo) y de 32 bits (Windows 95/98) permitiendo que el software generado puede ejecutarse cualquiera que sea la versión de Windows que maneja el usuario.

Una vez que se tienen claros los requisitos, y considerando que el software se construye para transformar datos de una forma a otra, es decir, para recibir información de entrada, manejarla de alguna manera, y proporcionar información de salida, el siguiente paso realizado fue definir la información que produciría y consumiría el sistema, las funciones

a realizar y su comportamiento. Este último se resume en el diagrama de la figura 7.

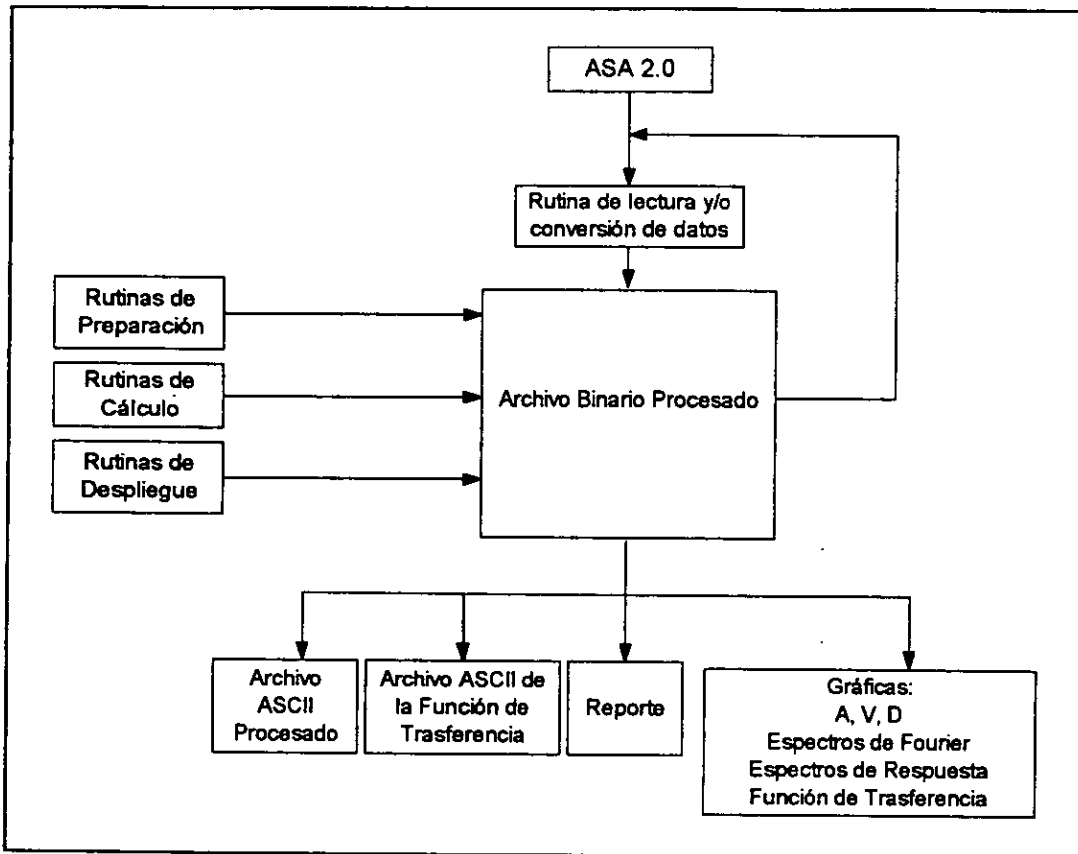


Fig. 7. Sistema ProAcel.

Como se observa, el sistema está integrado por una serie de rutinas que se han clasificado en tres categorías: 1) preparación, que como su nombre lo indica, acondiciona los datos para su procesamiento, 2) cálculo, las cuales realizan las operaciones matemáticas involucradas en la obtención de velocidades y desplazamientos, Transformadas de Fourier y Funciones de Tránsito, y 3) despliegue, que se encargan de la graficación de datos y elaboración de reportes, tanto en pantalla como en impresora. Estas rutinas se aplican a un archivo de datos denominado *Archivo Binario Procesado 1.0* (PBIN 1.0), que es generado cuando la rutina de lectura y/o conversión de datos es ejecutada con el *Archivo Estándar de Aceleración 2.0* (ASA 2.0) de entrada. Los resultados del procesamiento se proporcionan en tres formas: gráficas (aceleración, velocidad y desplazamiento, espectros de Fourier y Funciones de Tránsito), reportes que resumen los valores que caracterizan al evento, y archivos

de texto (ASCII's procesado). En el caso particular del cálculo de la Función de Traslación, su ejecución da origen al denominado *Archivo Binario de Función de Traslación* (FTBIN 1.0), del que se deriva el de salida *Archivo ASCII de Función de Traslación* (FTASC 1.0). La explicación en detalle de las gráficas y reportes se pospone para capítulos posteriores.

2.2.1.1 Archivos de ProAcel

Los archivos de datos de salida generados por ProAcel son de tipo texto con caracteres ASCII estándar. Su formato se diseñó con el fin de continuar la estandarización de archivos propuesta por el grupo de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes. Sin embargo, a pesar de las ventajas de universalidad, claridad y facilidad de manejo que implica el empleo de archivos ASCII, es conocido el hecho de que un archivo de este tipo es más grande que el mismo, expresado en formato binario. Estudios realizados previamente en el Idel a este respecto demostraron que en general, para almacenar datos en formato ASCII, específicamente en el ASA 2.0, se requiere aproximadamente 100% más bytes en relación al formato binario, en este caso el PBIN 1.0 (Fig. 8). Por esta razón, con el propósito de preservar el espacio requerido, tanto en memoria como en disco, ProAcel emplea datos binarios a lo largo del procesamiento, convirtiéndolos después a texto para proporcionar los resultados finales al usuario.

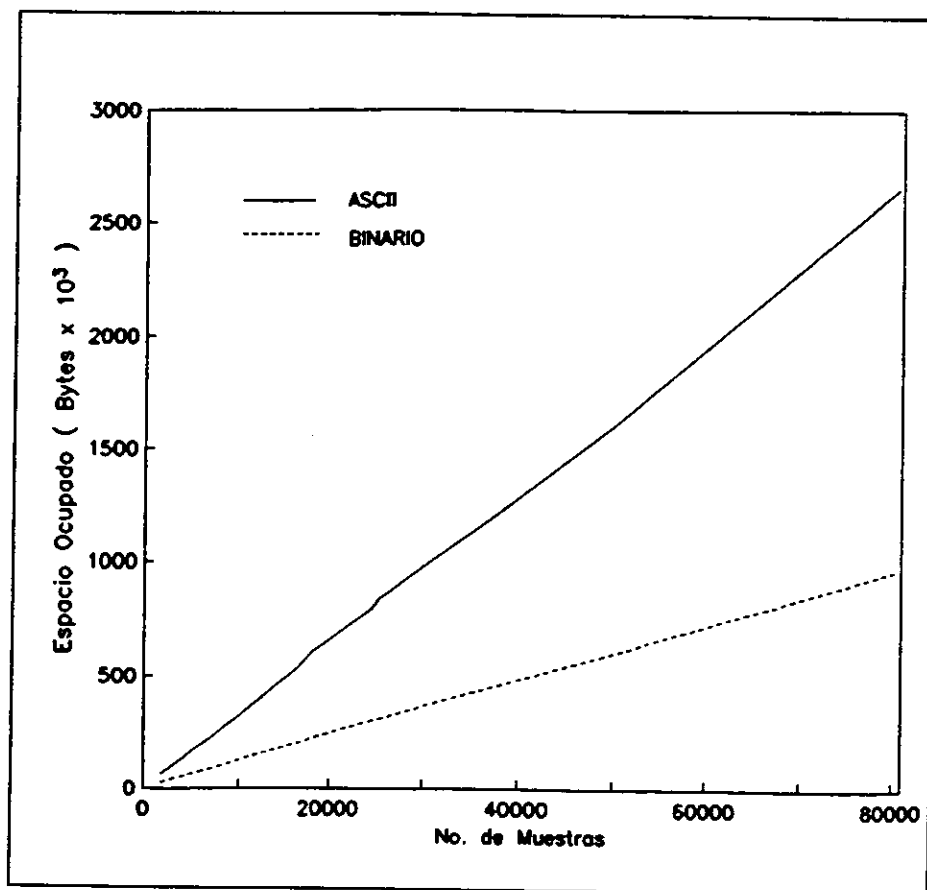


Fig. 8. Archivos ASCII vs Binario

2.2.1.1.1 Archivo Estándar de Aceleración (ASA 2.0)

Es un archivo ASCII, por lo que puede visualizarse y modificarse con cualquier editor de texto. Es autoexplicativo y el usuario no necesita información adicional para su interpretación y manejo. Está integrado básicamente por dos secciones que son las de encabezado y datos numéricos de aceleración. La primera proporciona información general relacionada con el acelerograma, la estación y el instrumento de registro; así como los parámetros más importantes del evento sísmico relacionado. La segunda sección contiene los valores de aceleración obtenidos durante el registro. En la figura 9 se presenta la estructura general del archivo, la cual se detalla en seguida.

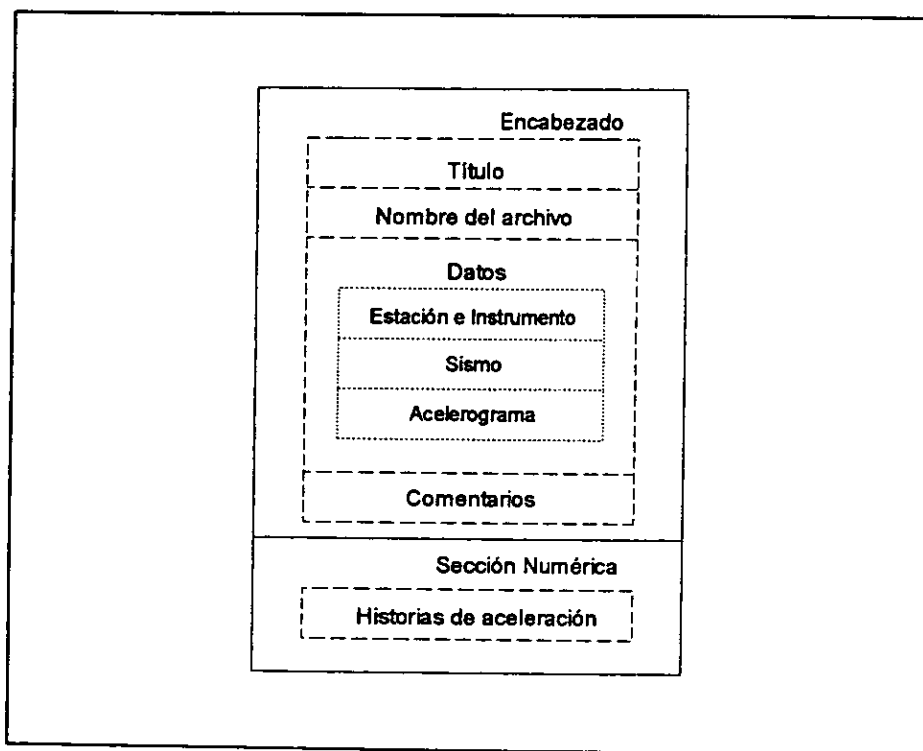


Fig. 9. Estructura del archivo ASA 2.0.

Título. Institución responsable, nombre, dirección, teléfono, etc.

Nombre del archivo. Denominación del archivo, versión del formato, fecha y hora de su creación y referencia al catálogo general de acelerogramas.

Estación e instrumento. Incluye una breve descripción de la estación, su nombre, código asignado, dirección y localización (coordenadas), altitud, tipo de suelo e institución a cargo de su operación. Del instrumento se especifican modelo, número de serie, número de canales, orientación, tasa de muestreo, escala completa de registro, frecuencia natural, amortiguamiento, intervalo de muestreo, umbral de activación para cada canal, tiempos de preevento y posevento.

Sismo. Fecha y tiempo de origen (GMT) del evento, magnitud, localización del epicentro, profundidad focal y la fuente que proporcionó esta información.

Acelerograma. Tiempo (GMT) de la primer muestra y exactitud, duración del registro, número total de muestras, valor máximo de aceleración (gal^3) para cada canal.

³ 1 gal=1 cm/s²

Comentarios. Información adicional que se considere importante como por ejemplo la calidad del registro, el método de procesamiento y filtrado, etc.

Historias de aceleración. Esta es la parte principal del archivo y como se indicó contiene los valores numéricos de aceleración de hasta 12 canales, correspondiendo cada línea horizontal a una muestra. Las series están organizadas por columnas con un campo fijo de 10 caracteres para cada una y con el formato que se especifica en la sección de encabezado.

2.2.1.1.2 Archivo Binario Procesado (PBIN 1.0)

Parte fundamental del sistema ProAcel lo constituye el archivo binario procesado, el cual se diseñó por una parte para ser totalmente compatible con el sistema de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes y por otra un archivo versátil que respondiera a las necesidades de procesamiento de datos del Idel. De hecho ProAcel utiliza como entrada de datos un archivo con formato ASA 2.0 el cual convierte a uno del tipo binario con la estructura que se indica en la figura 10, este último archivo es el denominado procesado o PBIN 1.0, y está integrado por tres secciones: Encabezado, Arreglo info y Datos numéricos.

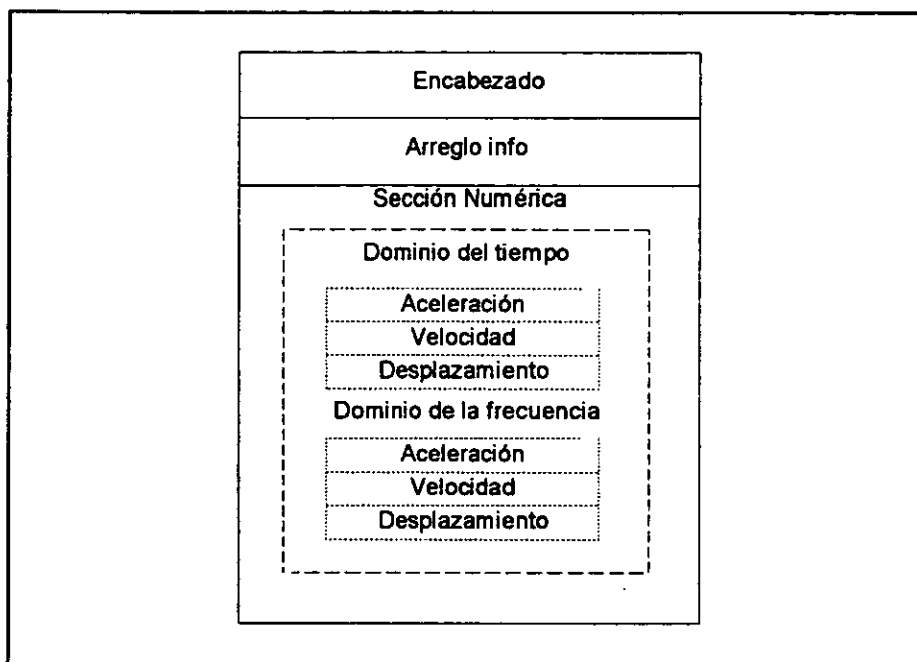


Fig. 10. Estructura del Archivo Binario Procesado PBIN 1.0.

Encabezado. Contiene información general del acelerograma y es una copia fiel del que se encuentra en el archivo de entrada. Está integrado de 110 líneas, cada una dividida en dos partes por un delimitador ":" en la columna 40 (excepto algunas que ocupan 80 columnas o más). De la columna 1 a la 39 es el área para el identificador del dato, la columna 41 es siempre un espacio y de la 42 en adelante inician los datos. La estructura del formato puede contener varios canales, de hecho la longitud de los renglones no está limitada a 80 columnas. Es importante señalar que cuando en una línea se especifica mas de un dato cada uno debe iniciar con el separador "/", en la figura 11 se muestra un ejemplo de un encabezado.

```

*****
                INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM
                Coordinación de Instrumentación Sísmica
                Ciudad Universitaria, Apartado Postal 70-472, Coyoacan 04510, México, D.F
                Tel.(52-5)622-3414 Fax.(52-5)616-1514 e-mail: isismica@mercalli.iingen.unam.mx
*****

ARCHIVO ESTANDAR DE ACELERACION:
VERSION DEL FORMATO                :2.0
NOMBRE DEL ARCHIVO                  :COPL9711.121
FECHA Y HORA DE CREACIÓN            :Wed Feb 18 14:01:52 1998
REF. CATALOGO ACELEROGRAMAS, SMIS 1995 :REGISTRO NO.      /PAG.

=====

DATOS DE LA ESTACION:
NOMBRE DE LA ESTACION              :COPALA
CLAVE DE LA ESTACION               :COPL
LOCALIZACION DE LA ESTACION        :Escuela Primaria Federal
                                    :"Otilio Montaño"
                                    :Copala, Guerrero.
                                    :
COORDENADAS DE LA ESTACION         :16.605 LAT. N
                                    :98.974 LONG. W
ALTITUD (msnm)                    :40
TIPO DE SUELO                      :ROCA
                                    :
INSTITUCION RESPONSABLE            :INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM
                                    :

=====

DATOS DEL ACELEROGRAFO:
MODELO DEL ACELEROGRAFO           :DCA-333
NUMERO DE SERIE DEL ACELEROGRAFO  :201
NUMERO DE CANALES                  :3
ORIENTACION C1-C6 (rumbo;orientacion) :/N/N90E/N00E
ORIENTACION C7-C12 (rumbo;orientacion) :
VEL. DE MUESTREO, C1-C6 (muestras/s) :/100/100/100
VEL. DE MUESTREO, C7-C12 (muestras/s) :
ESC. COMPLETA DE SENSORES, C1-C6, (g) :/1/1/1
    
```

Fig. 11. Ejemplo del encabezado de un archivo PBIN 1.0.

```

ESC. COMPLETA DE SENSORES, C7-C12 (g)      :
FREC. NAT. DE SENSORES, C1-C6, (g)        :/30.0/30.0/30.0
FREC. NAT. DE SENSORES, C7-C12, (g)      :
AMORTIGUAMIENTO DE SENSORES, C1-C6       :/0.714/0.727/0.789
AMORTIGUAMIENTO DE SENSORES, C7-C12     :
INTERVALO DE MUESTREO, C1-C6 (s)         :/0.01/0.01/0.01
INTERVALO DE MUESTREO, C7-C12 (s)       :
UMBRAL DE DISPARO, C1-C6 (Gal)           :/4/4/4
UMBRAL DE DISPARO, C7-C12 (Gal)         :
MEMORIA DE PREEVENTO (s)                 :4
TIEMPO DE POSEVENTO (s)                  :15
    
```

=====

DATOS DEL SISMO:

```

FECHA DEL SISMO (GMT)                    :12 de Noviembre de 1997
HORA EPICENTRO (GMT)                    :01:09:55
MAGNITUD(ES)                             :/M=4.0
COORDENADAS DEL EPICENTRO                :16.39 LAT. N
                                           :99.01 LONG. W
PROFUNDIDAD LOCAL(Km.)                  :15
FUENTE DE LOS DATOS EPICENTRALES        :Instituto de Geofisica, UNAM
                                           :SSN
    
```

=====

DATOS DE ESTE REGISTRO:

```

HORA DE LA PRIMERA MUESTRA (GMT)         :01:09:58
EXACTITUD DEL TIEMPO (s)                 :
DURACION DEL REGISTRO (s), C1-C6        :/15.43/15.43/15.43
DURACION DEL REGISTRO (s), C7-C12     :
NUM. TOTAL DE MUESTRAS, C1-C6          :/1543/1543/1543
NUM. TOTAL DE MUESTRAS, C7-C12        :
ACEL. MAX. (Gal), C1-C6                 :/-6.08/-9.57/13.82
ACEL. MAX., C1-C6, EN LA MUESTRA       :/381/378/381
ACEL. MAX. (Gal), C7-C12               :
ACEL. MAX., C7-C12, EN LA MUESTRA     :
UNIDADES DE LOS DATOS                   :Gal (cm/s/s)
FACTOR DE DECIMACION                    :1
FORMATO DATOS (FORTRAN, 10 campos/dato) :3F10.2
    
```

=====

CALIDAD DEL ACELEROGRAMA:

REGISTRO DIGITAL COMPLETO, CON TIEMPO ABSOLUTO CORRECTO.

=====

COMENTARIOS:

El equipo se encontró sin operar en la fecha de revisión. Se toma el tiempo de la primera muestra del registro y se deja sin fracciones de segundo.

=====

DATOS DE ACELERACION:

```

+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
CANAL-1  CANAL-2  CANAL-3
  V      N90E    N00E
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
    
```

Fig. 11. (Continuación).

La definición de cada una de sus líneas se presenta en la tabla 1.

Línea	Descripción
1	Línea divisoria de 80 asteriscos
2-5	Espacio disponible para poner en formato libre datos de la institución, del registro o cualquier otra información
6	Línea divisoria de 80 asteriscos
7	Título "ARCHIVO ESTÁNDAR DE ACELERACIÓN"
8	Versión del formato de los datos del archivo Nombre del archivo con el siguiente formato: XXXX AA MM . DD & donde
9	XXXX es la clave de la estación AA es el año de ocurrencia del evento MM es el mes DD es el día & corresponde al número de evento
10	Fecha y hora en que fue creado el archivo
11	Referencia del registro en el Catálogo de Acelerogramas, SMIS 1995. Se especifica el N° de registro y la página correspondiente al catálogo
12	Línea en blanco (para uso futuro)
13	Línea en blanco (para uso futuro)
14	Línea de separación de párrafo
15	Subtítulo "DATOS DE LA ESTACIÓN"
16	Nombre de la estación (se recomienda máximo 39 caracteres)
17	Clave de la estación. Son los primeros cuatro caracteres del nombre del archivo
18-22	Localización de la estación. Cinco líneas (se recomienda máximo 39 caracteres c.u.). Puede contener la localización, acceso a la misma y ubicación del sensor dentro de la estación (por ejemplo pozo y profundidad, nivel dentro del edificio, etc.)
23	Latitud geográfica de la estación en grados
24	Longitud geográfica de la estación en grados
25	Altitud media sobre el nivel del mar, en metros
26-28	Descripción del tipo de suelo de la estación. Tres líneas (se recomienda máximo 39 caracteres c.u.)
29 y 30	Institución responsable de la operación de la estación. Dos líneas (se recomienda máximo 39 caracteres c.u.)
31	Línea en blanco (para uso futuro)
32	Línea de separación de párrafo
33	Subtítulo "DATOS DEL ACELERÓGRAFO"
34	Modelo (y opcional marca) del aparato
35	Número de serie del aparato
36	Número de canales del aparato
37	Orientación de los canales 1 hasta 6. Se da primero el rumbo y luego, para el caso en que el aparato se encuentre en una estructura, la ubicación del instrumento respecto a la estructura (en presas, edificios, etc.). El rumbo y la orientación deberán estar separados por un ':'. A su vez, cada dato de cada canal deberá estar separado por '/'
38	Orientación de los canales 7 hasta 12, igual que en la línea 37

Tabla 1. Descripción del encabezado.

Línea	Descripción
39	Velocidad o tasa de muestreo de los canales 1 hasta 6 en el orden canal 1, 2, 3, ..., separados por un '/'; expresada en número de muestras/segundo
40	Velocidad o tasa de muestreo de los canales 7 hasta 12 igual que línea 39
41	Escala completa de los sensores 1 hasta 6, en el orden canal 1, 2, 3, ..., separadas por un '/'; expresada en unidades de g (g=valor de la gravedad terrestre)
42	Escala completa de los sensores 7 hasta 12 igual que línea 41
43	Frecuencia natural de los sensores 1 hasta 6, en el orden canal 1, 2, 3, ..., separados por un '/', expresada en Hz
44	Frecuencia natural de los sensores 7 hasta 12 igual que línea 43
45	Amortiguamiento de los sensores 1 hasta 6, en el orden canal 1, 2, 3, ..., separados por un '/', dato adimensional (fracción del amortiguamiento crítico)
46	Amortiguamiento de los sensores 7 hasta 12 igual que línea 45
47	Intervalo de muestreo de los canales 1 hasta 6, en el orden canal 1, 2, 3, ..., separados por un '/', expresada en segundos. El intervalo de muestreo está referido a un factor de decimación de 1, aunque en la línea 79 se especifique un factor distinto
48	Intervalo de muestreo de los canales 7 hasta 12 igual que línea 47
49	Umbral de disparo de los canales 1 hasta 6, en el orden canal 1, 2, 3, ..., separados por un '/', expresada en Gal (cm/s/s)
50	Umbral de disparo de los canales 7 hasta 12 igual que línea 49
51	Memoria o tiempo de preevento, expresado en segundos
52	Tiempo de posevento, expresado en segundos
53	Línea en blanco (para uso futuro)
54	Línea en blanco (para uso futuro)
55	Línea de separación de párrafo
56	Subtítulo "DATOS DEL SISMO"
57	Fecha del sismo, referido a la hora GMT
58	Hora de ocurrencia en el epicentro, referido a la hora GMT
59	Magnitud del sismo. Pueden especificarse varios tipos de magnitud, cada una separada por un '/'
60	Latitud geográfica del epicentro en grados
61	Longitud geográfica del epicentro en grados
62	Profundidad del hipocentro, en kilómetros
63 y 64	Fuente (institución) que proporcionó los datos epicentrales de acuerdo a la clave dada en la base de datos (máximo 39 caracteres)
65	Línea en blanco
66	Línea de separación de párrafo
67	Subtítulo "DATOS DE ESTE REGISTRO"
68	Hora de la primer muestra del acelerograma, referida a la hora GMT
69	Exactitud con que fue registrado el tiempo, en segundos
70	Duración total de las series de aceleración canales 1 hasta 6, en segundos
71	Duración total de las series de aceleración canales 7 hasta 12, en segundos
72	Número total de muestras de las series de aceleración canales 1 hasta 6
73	Número total de muestras de las series de aceleración canales 7 hasta 12
74	Valor máximo de aceleración de las series canales 1 hasta 6, en Gal
75	Muestra en la que ocurrió el máximo de la serie del canal 1 hasta 6
76	Valor máximo de aceleración de las series canales 7 hasta 12 en Gal
77	Muestra en la que ocurrió el máximo de la serie del canal 7 hasta 12
78	Unidades de los datos de aceleración de este registro

Tabla 1. (Continuación).

Línea	Descripción
79	Factor de decimación de los datos presentados
80	Formato de los datos numéricos de aceleración presentados, formato tipo FORTRAN, 1 hasta 12 datos en campos fijos de 10 localidades cada uno
81	Línea en blanco (para uso futuro)
82	Línea en blanco
83	Línea de separación de párrafo
84	Subtítulo "CALIDAD DEL ACELEROGRAMA"
85-87	Hasta tres líneas para el comentario sobre la calidad del acelerograma de acuerdo a la clasificación (clave) dada en la base de datos. Formato libre
88	Línea de separación de párrafo
89	Subtítulo "COMENTARIOS"
90-99	Diez líneas para comentarios con formato abierto. Se puede poner alguna aclaración sobre el sismo, el registro o el aparato. También se pueden poner los parámetros de corrección o de filtrado del registro
100-103	Espacio reservado para futuras versiones, pero puede ser utilizado por el usuario para agregar algún dato de su interés
104	Línea de separación de párrafo
105	Subtítulo "DATOS DE ACELERACIÓN"
106	Línea de rayas con demarcaciones de los campos (+) para los datos numéricos de 1 hasta 12 series de datos (solo se señalan 8), Cada campo forzosamente será de 10 localidades
107	Identificador de los canales 1 hasta 12 (solo se señalan 8), justificados a la derecha de cada campo
108	Orientación (rumbo y orientación estructural, separados por ";") correspondiente a cada canal, justificado a la derecha de cada campo
109	Línea de rayas con demarcaciones de los campos (+) para los datos numéricos de 1 hasta 12 series (solo se señalan 8), igual que línea 106

Tabla 1. (Continuación).

Arreglo info. El objetivo de esta sección es almacenar los resultados del proceso en particular que se realice, los cuales posteriormente pueden ser modificados durante las diferentes etapas de ejecución de ProAcel. El tamaño de la sección es de 800 bytes (200 datos de tipo float) y su organización se basa en el arreglo⁴ mostrado en la tabla 2.

Elemento	Descripción
0-2	Frecuencias naturales de los sensores, canal 1, 2 y 3.
3-5	Amortiguamiento de los sensores.
6-8	Intervalos de muestreo.
9-11	Número de muestras (modificadas).
12-14	Máximas aceleraciones (antes de cualquier proceso).

Tabla 2. Sección Arreglo info.

⁴ Un arreglo es un bloque de objetos que en memoria están numerados o direccionados consecutivamente. Cada objeto del arreglo se denomina elemento.

Elemento	Descripción
15	Formato de los datos.
16-18	Valores medios (originales).
19-21	Factores de escala.
22-24	Máximas aceleraciones (procesadas).
25-27	Factores de decimación.
28	Tiempo de inicio de la señal correspondiente a canal 1.
29	Tiempo final de la señal correspondiente a canal 1.
30	Tiempo inicial canal 2.
31	Tiempo final canal 2.
32	Tiempo inicial canal 3.
33	Tiempo final canal 3.
34	Si el contenido es 1000, indica que ya se ejecutó rutina Media.
35-37	Valores medios para cada canal (modificados).
38	Si su contenido es 1000, ya se ejecutó rutina Corta.
39	Reservado para uso posterior.
40	Dirección inicial de los datos de velocidad, canal 1.
41	Velocidad máxima canal 1.
42	Dirección inicial de los datos de desplazamiento, canal 1.
43	Desplazamiento máximo canal 1.
44	Dirección de inicio del bloque de datos de velocidad, canal 2.
45	Velocidad máxima canal 2.
46	Dirección de inicio de datos de desplazamiento, canal 2.
47	Desplazamiento máximo canal 2.
48	Reservado para uso posterior.
49	Reservado para uso posterior.
50	Si el contenido es 1000, ya se ejecutó rutina Integra
51	Un valor de 1000 indica que se realizó el cálculo de la FFT sin diezmar para canal 1, si es 2000 se realizó un diezclado previo.
52	Reservado para uso posterior.
53	Dirección inicial bloque de datos de velocidad, canal 3.
54	Velocidad máxima canal 3.
55	Dirección de inicio datos de desplazamiento, canal 3.
56	Desplazamiento máximo canal 3.
57	Número de puntos de la Transformada de Fourier de Aceleración (FA), canal 1.
58	Dirección inicial, datos de Fourier de aceleración (FA), canal 1.
59	Amplitud máxima, FA canal 1.
60	Muestra en que ocurre máximo de FA canal 1.
61	Número de puntos de FA canal 2.
62	Dirección inicial, FA canal 2.
63	Amplitud máxima, FA canal 2.
64	Muestra en que ocurre máximo de FA canal 2.
65	Número de puntos de FA canal 3.
66	Dirección de inicio de FA canal 3.
67	Amplitud máxima de FA canal 3.
68	Muestra en que ocurre máximo de FA canal 3.
69	Número de puntos de la Transformada de Fourier de Velocidad (FV), canal 1.
70	Dirección inicial, datos de Fourier de velocidad (FV), canal 1.
71	Amplitud máxima, FV canal 1.
72	Muestra en que ocurre máximo de FV canal 1.

Tabla 2. (Continuación).

Elemento	Descripción
73	Número de puntos de FV canal 2.
74	Dirección inicial, FV canal 2.
75	Amplitud máxima, FV canal 2.
76	Muestra en que ocurre máximo de FV canal 2.
77	Número de puntos de FV canal 3.
78	Dirección de inicio de FV canal 3.
79	Amplitud máxima de FV canal 3.
80	Muestra en que ocurre máximo de FV canal 3.
81	Número de puntos de la Transformada de Fourier de Desplazamiento (FD), canal 1.
82	Dirección inicial, datos de Fourier de desplazamiento (FD), canal 1.
83	Amplitud máxima, FD canal 1.
84	Muestra en que ocurre máximo de FD canal 1.
85	Número de puntos de FD canal 2.
86	Dirección inicial, FD canal 2.
87	Amplitud máxima, FD canal 2.
88	Muestra en que ocurre máximo de FD canal 2.
89	Número de puntos de FD canal 3.
90	Dirección de inicio de FD canal 3.
91	Amplitud máxima de FD canal 3.
92	Muestra en que ocurre máximo de FD canal 3.
93	Reservado para uso posterior.
94-96	Intervalos de muestreo originales.
97-99	Número de muestras (originales).
100-102	Muestras en que ocurre aceleraciones máximas (originales).
103	Muestra en que ocurre velocidad máxima canal 1.
104	Muestra en que ocurre desplazamiento máximo canal 1.
105	Muestra en que ocurre velocidad máxima canal 2.
106	Muestra en que ocurre desplazamiento máximo canal 2.
107	Muestra en que ocurre velocidad máxima canal 3.
108	Muestra en que ocurre desplazamiento máximo canal 3.
109-111	Muestras en que ocurre aceleraciones máximas (modificadas).
112	Velocidad inicial empleada en rutina Integra.
113	Desplazamiento inicial empleado en rutina Integra.
114	Un valor de 1000 indica que se realizó el cálculo de la FFT sin diezmar para canal 2; si es 2000 se realizó diezclado previo.
115	Igual que descripción anterior para canal 3.
116	Si el contenido es 1000, significa que para el cálculo de FA de canal 1 se empleó un factor de normalización sísmico. Si es 2000, el factor empleado fue sísmológico.
117	Igual que elemento anterior, para canal 2.
118	Igual que elemento anterior, para canal 3.
119-129	Localidades reservadas para uso posterior.
130-132	Incremento en frecuencia de los datos de FA.
133-135	Incremento en frecuencia de FV.
136-138	Incremento en frecuencia de FD.
139-199	Reservado para uso futuro.

Tabla 2. (Continuación)

Datos numéricos. La integración de esta sección depende del procesamiento realizado y puede contener historias de aceleración, velocidad y desplazamiento o sus correspondientes representaciones en el dominio de la frecuencia (Fig. 10). Por lo anterior su tamaño es variable y también está condicionado al número de canales y de muestras de cada señal. En este caso los datos, que también son de tipo float, ocupan 4 bytes.

2.2.1.1.3 Archivo Binario de la Función de Tránsito (FTBIN 1.0)

Este archivo almacena los resultados del cálculo de la Función de Tránsito, la cual se obtiene como el cociente de una señal de entrada y una de salida. Lo constituye un encabezado, un bloque de parámetros y otro de datos (Fig. 12).

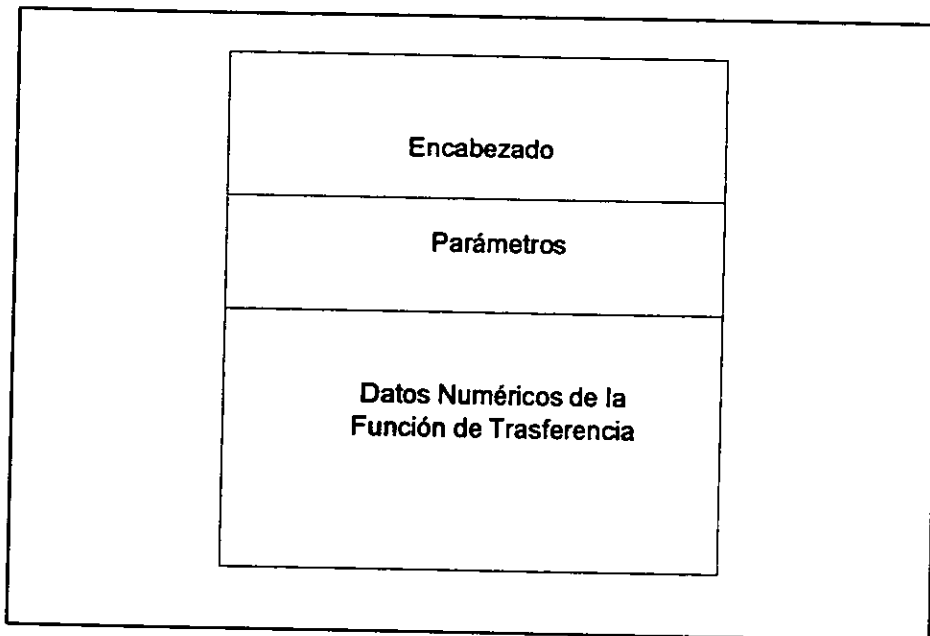


Fig. 12. Estructura del Archivo Binario de la Función de Tránsito.

Encabezado. Indica los acelerogramas con los que se calculó la Función de Tránsito, el número de muestras de cada canal, el incremento en frecuencia, etc. Está integrado por 17 líneas descritas en la tabla 3.

Línea	Descripción
1	Línea divisoria de 80 asteriscos
2	Título "ARCHIVO DE FUNCIÓN DE TRASFERENCIA DE ACELERACIÓN" o según sea el caso, velocidad o desplazamiento.
3	Archivo Entrada
4	Archivo Salida
5	Número de muestras del canal 1
6	Número de muestras del canal 2
7	Número de muestras del canal 3
8	Incremento en frecuencia, canal 1
9	Incremento en frecuencia, canal 2
10	Incremento en frecuencia, canal 3
11	Amplitud máxima de los datos correspondientes al canal 1
12	Muestra en que ocurre amplitud máxima del canal 1
13	Amplitud máxima de los datos correspondientes al canal 2
14	Muestra en que ocurre amplitud máxima del canal 2
15	Amplitud máxima en el canal 3
16	Muestra en que se localiza amplitud máxima del canal 3
17	Línea divisoria de 80 asteriscos

Tabla 3. Descripción del encabezado del archivo FTBIN 1.0.

En la figura 13 se muestra un ejemplo del encabezado de un Archivo Binario de la Función de Tránsito:

```

*****
ARCHIVO DE FUNCIÓN DE TRASFERENCIA DE ACELERACIÓN
Nombre del archivo entrada:          c:\procesad\cop19711.121
Nombre del archivo salida:          c:\procesad\atyc9711.121
Número de muestras de canal 1:      1025
Número de muestras de canal 2:      1025
Número de muestras de canal 3:      1025
Incremento en frecuencia canal 1:    0.0488281
Incremento en frecuencia canal 2:    0.0488281
Incremento en frecuencia canal 3:    0.0488281
Amplitud máxima canal 1:            0.676138
Muestra en que ocurrió el máximo de canal 1: 1
Amplitud máxima canal 2:            0.648478
Muestra en que ocurrió el máximo de canal 2: 1
Amplitud máxima canal 3:            0.86515
Muestra en que ocurrió el máximo de canal 3: 2
*****
    
```

Fig. 13. Encabezado del Archivo de Función de Tránsito.

Sección de parámetros: Tiene un tamaño de 52 bytes (13 datos de tipo float) organizados como un arreglo (tabla 4).

Elemento	Descripción
0	Tipo de datos con los que se realizó el cálculo de acuerdo a: 0, aceleración 1, velocidad 2, desplazamiento
1-3	Número de muestras de los canales 1 al 3
4-6	Incrementos en frecuencia de los canales 1 al 3
7	Amplitud máxima, canal 1
8	Número de muestra en que ocurre amplitud máxima del canal 1
9	Amplitud máxima, canal 2
10	Número de muestra en que ocurre amplitud máxima del canal 2
11	Amplitud máxima, canal 3
12	Número de muestra en que ocurre amplitud máxima del canal 3

Tabla 4. Arreglo de la sección de parámetros.

Sección de datos. Contiene los datos numéricos (en formato binario) que resultaron del cálculo de la Función de Tránsito. Su tamaño es variable y depende del número de muestras de cada señal. Cada dato es de tipo float con una longitud de 4 bytes.

2.2.1.1.4 Archivo ASCII Procesado (ASAP 1.0)

Como se mencionó previamente, la sección numérica del archivo PBIN 1.0 puede contener datos de aceleración, velocidad y desplazamiento, así como sus correspondientes representaciones en el dominio de la frecuencia. Cada uno de los diferentes tipos de datos que contenga, puede -a elección del usuario- dar origen al correspondiente Archivo ASCII Procesado, de modo tal que pueden generarse Archivos ASCII Procesado de Aceleración, de Velocidad, etc.. Estos tienen la misma estructura que el ASA 2.0 (Fig. 9), la diferencia radica en el nombre que se le ha dado a algunos identificadores de datos del encabezado con la finalidad de hacerlos congruentes con el tipo de información que contiene el archivo. Por ejemplo, si se trata de un archivo de velocidad, el identificador ARCHIVO ESTANDAR DE ACELERACION que corresponde a la línea 7 de acuerdo a la tabla 1 mostrada con anterioridad cambia a ARCHIVO ESTANDAR DE VELOCIDAD. La tabla 5 resume los cambios realizados.

Línea	Tipo de datos del Archivo ASCII Procesado				
	Velocidad	Desplazamiento	FFT Aceleración	FFT Velocidad	FFT Desplazamiento
7	ARCHIVO ESTÁNDAR DE VELOCIDAD	ARCHIVO ESTÁNDAR DE DESPLAZAMIENTO	ARCHIVO ESTANDAR DE FFT DE ACCELERACIÓN	ARCHIVO ESTÁNDAR DE FFT DE VELOCIDAD	ARCHIVO ESTÁNDAR DE FFT DE DESPLAZAMIENTO
74	VEL. MAX. (cm/s), C1-C6	DESP. MAX. (cm), C1-C6	AMPLITUD MAX., C1-C6	AMPLITUD MAX., C1-C6	AMPLITUD MAX., C1-C6
75	VEL. MAX., C1-C6, EN LA MUESTRA	DESP. MAX., C1-C6, EN LA MUESTRA	AMPLITUD MAX., C1-C6, EN LA MUESTRA	AMPLITUD MAX., C1-C6, EN LA MUESTRA	AMPLITUD MAX., C1-C6, EN LA MUESTRA
76	VEL. MAX. (cm/s), C7-C12	DESP. MAX. (cm), C7-C12	AMPLITUD MAX., C7-C12	AMPLITUD MAX., C7-C12	AMPLITUD MAX., C7-C12
77	VEL. MAX., C7-C12, EN LA MUESTRA	DESP. MAX., C7-C12, EN LA MUESTRA	AMPLITUD MAX., C7-C12, EN LA MUESTRA	AMPLITUD MAX., C7-C12, EN LA MUESTRA	AMPLITUD MAX., C7-C12, EN LA MUESTRA
84	CALIDAD DEL REGISTRO	CALIDAD DEL REGISTRO	CALIDAD DEL REGISTRO	CALIDAD DEL REGISTRO	CALIDAD DEL REGISTRO
105	DATOS DE VELOCIDAD	DATOS DE DESPLAZAMIENTO	DATOS DE FFT DE ACCELERACIÓN	DATOS DE FFT DE VELOCIDAD	DATOS DE FFT DE DESPLAZAMIENTO

Tabla 5. Modificaciones al encabezado ASA 2.0.

Los datos son de tipo texto con el formato FORTRAN indicado en la línea 80 del encabezado. A continuación se muestra un segmento del encabezado así como algunas líneas de datos como ejemplo (Fig. 14).

```

=====
DATOS DE VELOCIDAD:
-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
CANAL-1  CANAL-2  CANAL-3
  V      N90E    N00E
-----+-----+-----+-----+-----+-----+
-15.91   26.38   -13.50
-14.97   68.29   -15.41
-26.35   28.45   -24.92
  
```

Fig. 14. Ejemplo del formato de datos del ASAP 1.0.

2.2.1.1.5 Archivo ASCII de Función de Traslación (FTASC 1.0)

Se genera a partir del FTBIN 1.0. Está formado por un encabezado y una sección de datos. El primero es igual que el del Archivo Binario de la Función de Traslación que lo origina (Fig. 13). En cuanto a los datos numéricos, son de tipo texto con el formato FORTRAN 3F10.3, de modo que sea lo más consistente posible con la estructura del ASA 2.0. La figura 15 muestra una parte de la sección de datos del FTASC 1.0.

Amplitud máxima canal 2:			0.648478
Muestra en que ocurrió el máximo de canal 2:			1
Amplitud máxima canal 3:			0.86515
Muestra en que ocurrió el máximo de canal 3:			2

7.659	4.631	7.142	
2.076	3.613	7.351	
7.589	9.507	2.727	

Fig. 15. Ejemplo del formato de datos del FTASC 1.0.

Una vez concluida la definición de la información de entrada y salida del sistema se prosiguió con el diseño del mismo. Este es un proceso iterativo a través del cual se traducen los requisitos en una representación del software (Ref. 16). En la siguiente sección se exponen algunas ideas y conceptos que se tomaron en consideración para el diseño de ProAcel.

2.2.2 Metodología.

En sus primeros días, la creación de software se realizaba de forma indisciplinada, prácticamente a prueba y error. Existían pocos métodos formales de programación y muy pocos programadores los empleaban. Hoy en día la situación ha cambiado notablemente. Existe una gran variedad de métodos y herramientas que persiguen brindar a los desarrolladores un marco de trabajo que les permita construir software más fiable y de más alta calidad. A este conjunto de métodos y herramientas de desarrollo a menudo se le conoce como modelo de proceso o paradigma (Ref. 17). A partir de la segunda mitad de los años noventa, uno de estos modelos de proceso comenzó a tener gran popularidad convirtiéndose en una metodología ampliamente usada, de hecho, algunos autores consideran (Martin y Odell, 1994 y Pressman, 1998) que con el paso del tiempo el *Paradigma Orientado a Objetos* reemplazará a los enfoques clásicos de desarrollo de

software. Esto se debe en gran medida a que -entre otras características- las tecnologías de objetos conducen al desarrollo más rápido y de mayor calidad de software, demanda principal tanto de la industria de la computación como de las empresas de todo tipo que crean sus propias aplicaciones.

2.2.2.1 Conceptos

A pesar de que el punto central de esta metodología es el concepto de objeto, resulta difícil definirlo. En un diccionario por ejemplo, se puede encontrar la siguiente definición:

Un objeto es una cosa material y determinada. Es una entidad tangible que exhibe algún comportamiento bien definido.

En términos de programación, un **objeto** no es necesariamente algo tangible, puede ser cualquier cosa real o abstracta acerca de la cual almacenamos datos y los métodos que los controlan (Ref. 18). Todo objeto tiene estado, comportamiento e identidad. El primero resulta de la abstracción⁵ de las características distintivas del mismo y los valores de cada una de estas propiedades (valores de datos), el comportamiento es la forma como actúa en términos de cambio de estado y envío y recepción de mensajes -un objeto muestra su comportamiento mediante la invocación de un método (operaciones) como respuesta a un mensaje (Ref. 19)-, y la identidad es la propiedad de un objeto que lo distingue de todos los demás, esto es, su identificador. Lo más común es que un programa tenga varios objetos con propiedades y comportamiento similares, así que en lugar de repetir la definición de un objeto se agrupan las características comunes de estos en una clase. Una **clase** es entonces, una descripción generalizada (una plantilla o un patrón) que describe una colección de objetos (Ref. 20). Cada objeto es un ejemplar de alguna clase y todos los objetos de la misma clase se comportan en forma similar (invocan al mismo método) como respuesta a un mensaje similar.

La figura 16 muestra una representación alternativa de una clase.

⁵ Es la descripción simplificada de un objeto que hace énfasis en algunos detalles o propiedades y suprime otros.

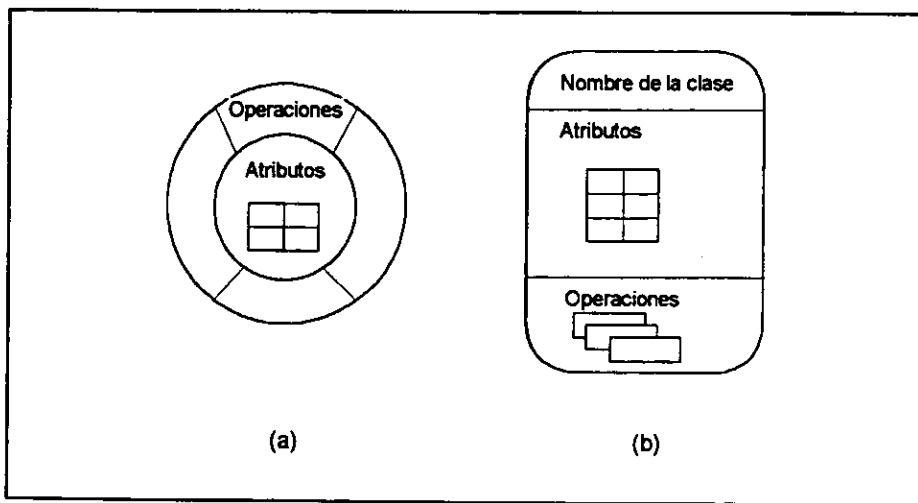


Fig. 16. Representación alternativa de una clase.

Del inciso (a) de la figura 16 puede observarse que las abstracciones de datos⁶ -también llamadas atributos- que describen la clase están encerradas por una barrera de abstracciones procedimentales⁷ llamadas operaciones, métodos o servicios, capaces de manejar los datos de alguna forma. La única manera de alcanzar los atributos y manipularlos es por medio de alguna de las operaciones que forman la barrera. Por lo tanto, la clase encapsula⁸ datos, y los métodos que los manipulan, lo cual hace posible el ocultamiento de la información y reduce el impacto de efectos colaterales asociados a cambios. Por definición, todos los objetos que existen dentro de una clase heredan sus atributos y las operaciones disponibles para manejarlos.

Veamos un ejemplo de un objeto común del mundo real, un *Escritorio*. Este pertenece a una clase de objetos más grande denominada *Mueble* que posee un conjunto de atributos genéricos como precio, color, dimensiones y localización, entre otros. Estos atributos son aplicables a todos los ejemplares de *Mueble*, se trate de una *Silla*, una *Mesa*, un *Librero*, etc. Por otra parte, todo objeto de la clase *Mueble* puede manipularse de alguna manera. Es posible comprarlo o venderlo, o moverlo de un lugar a otro, y cada una de estas operaciones modificará uno o más atributos del objeto. Por ejemplo la

⁶ Una abstracción de datos es una colección determinada de datos que describen un objeto.

⁷ Una abstracción procedimental es una secuencia dada de instrucciones que tiene una función específica y limitada.

⁸ El empaque conjunto de datos y métodos se llama encapsulado. El objeto esconde sus datos de los demás objetos y permite el acceso a estos mediante sus propios métodos. El encapsulado evita la corrupción de los datos de un objeto y oculta los detalles de su implementación interna a los usuarios. Estos se dan cuenta de las operaciones que pueden solicitar de un objeto pero desconocen los detalles de cómo se lleva a cabo la operación. Todos los detalles específicos de los datos del objeto y la codificación de sus operaciones están fuera del alcance del usuario.

operación mover, modificará el atributo lugar. Puesto que el objeto *Escritorio* pertenece a la clase *Mueble*, entonces hereda sus atributos y operaciones (Fig. 17).

Es posible y conveniente organizar a las clases en una estructura jerárquica, en la cual, las que se encuentran en niveles más bajos en la jerarquía tienen acceso y pueden usar datos y comportamiento asociados con clases más altas de la misma. Este mecanismo se conoce como *herencia*. La figura 18 muestra una jerarquía de clases muy simple en donde puede observarse que la subclase hereda todos los métodos de su superclase.

Cualquier cambio en los datos u operaciones contenidas en una superclase se hereda inmediatamente por todas las subclases que se derivan de ella, lo que convierte a la jerarquía en un medio para propagar cambios a través de todo el sistema. Debe destacarse el hecho de que en cada nivel de la jerarquía pueden agregarse nuevos datos y operaciones, o sobreescribirse los ya existentes, más aún, en ocasiones es posible heredar atributos y operaciones de más de una clase, acción conocida como *herencia múltiple*. Para ilustrar este concepto, considérese un nuevo objeto llamado *Silla* que es una mezcla entre una silla y una mesa. Entonces este objeto heredará las operaciones y atributos de la clase *Silla* así como también los de la clase *Mesa* (Fig. 19).

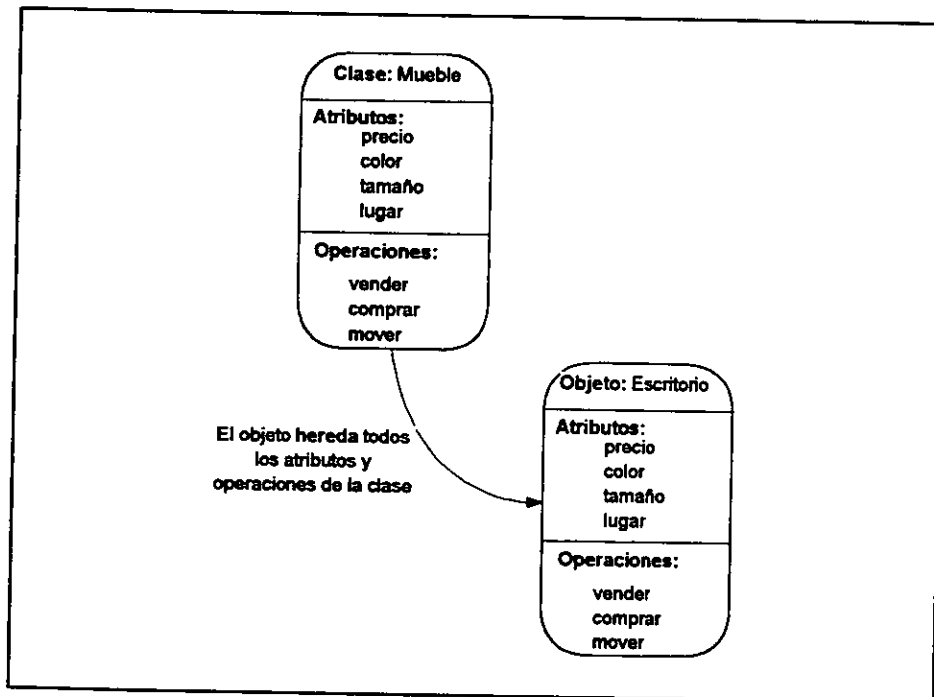


Fig. 17. Ejemplo de herencia. El objeto *Escritorio* hereda todos los atributos y operaciones de la clase *Mueble* a la que pertenece.

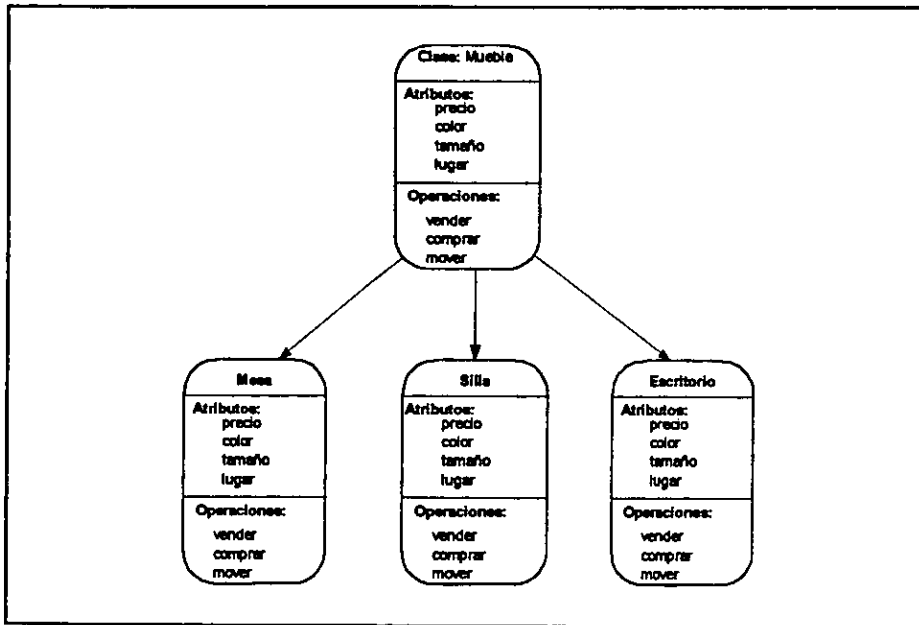


Fig. 18. Ejemplo de una jerarquía de clases. Silla, Mesa y Escritorio heredan todos los atributos y operaciones de su superclase Mueble

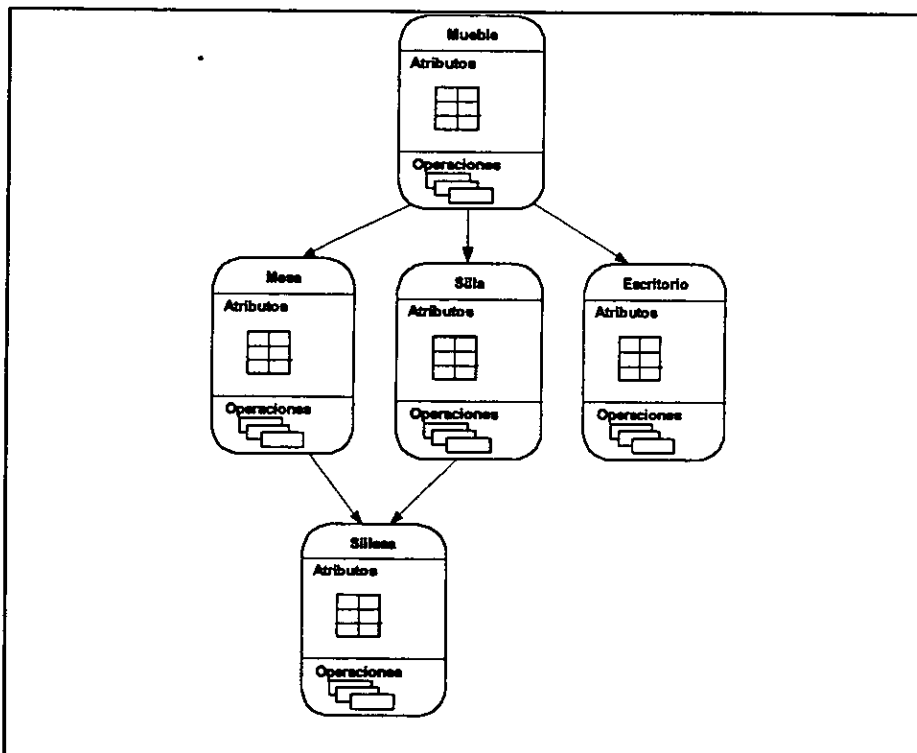


Fig. 19. Ejemplo de herencia múltiple. La clase Sillasa hereda los atributos y operaciones de Mesa y Silla.

La herencia es una de las contribuciones más importantes de la programación orientada a objetos, ya que mediante su empleo es posible lograr la reutilización de código. En ciertos casos algunas de las operaciones heredadas de una superclase requieren adaptaciones para resolver necesidades particulares de la clase hija y aunque estas operaciones sean distintas en implementación, llevan a cabo la misma tarea. Este fenómeno se conoce como **polimorfismo**, y se aplica a un método que adopta varias formas de implementación (Ref. 21), dicho de otra forma, es la capacidad de tener métodos con el mismo nombre pero que su implementación sea diferente. Continuando con nuestro ejemplo, supongamos que la clase *Mueble* cuenta con la operación *Renovar*, cuya tarea consiste en cambiar la apariencia de un objeto haciéndolo parecer nuevo. Considerando a la jerarquía mostrada en la figura 18, las subclases *Mesa*, *Silla* y *Escritorio* heredarían esta operación, sin embargo, en el caso especial de *Silla*, la operación *Renovar* debe adecuarse a las necesidades particulares de la clase, y mientras que para el caso de *Mesa* y *Escritorio* la operación podría consistir únicamente en pintar el objeto, para *Silla* debe sumarse la acción de tapizar las partes necesarias. Como se observa, aunque para las tres clases la tarea y el nombre de la operación que la realiza es igual, la implementación es diferente.

Otra muestra de polimorfismo se da al usar un operador para aplicarlo a elementos de diferente tipo, por ejemplo, al pretender sumar enteros, reales o complejos se emplea el mismo operador +. Este tipo de polimorfismo es conocido como sobrecarga de operadores.

El medio por el cual los objetos interactúan son los **mensajes**. La acción se inicia cuando un objeto recibe una solicitud o mensaje, el cual hace que se ejecute el método apropiado y, de manera opcional se produzca una respuesta. El mensaje que constituye la solicitud contiene el nombre del objeto que ejecutará la acción (objeto receptor), el nombre de la operación a realizar y, a veces, un grupo de parámetros (Fig. 20).

Hasta este punto se han introducido algunos conceptos básicos sobre el paradigma orientado a objetos, ahora es posible concluir diciendo que la programación orientada a objetos es un enfoque metodológico para la solución de problemas en el que, con frecuencia, el mundo se piensa en términos de objetos, operaciones y mensajes que se transfieren entre tales objetos (Ref. 22), o más formalmente, según Coad y Yourdon (Ref. 23):

orientación a objetos = objetos + clasificación + herencia + comunicación

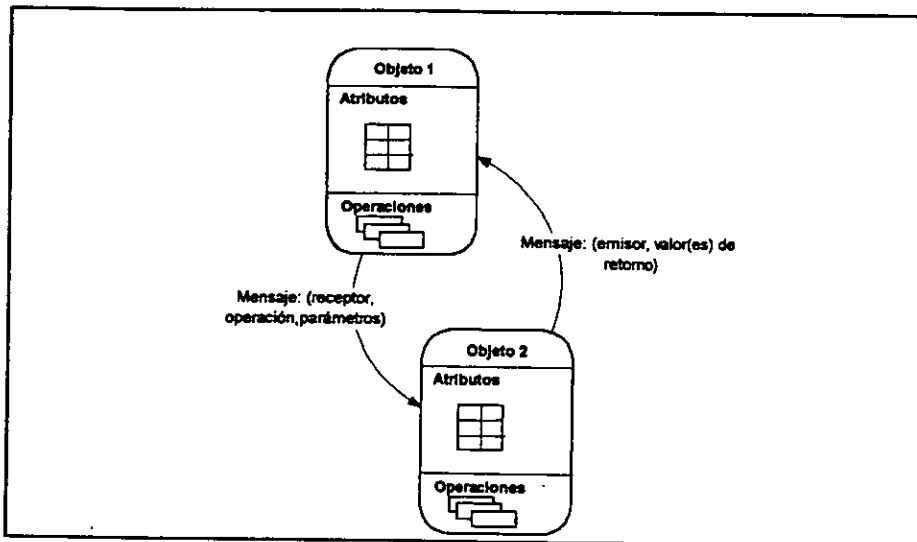


Fig. 20. Paso de mensajes entre objetos.

Las técnicas orientadas a objetos cambian nuestra forma de pensar acerca de los sistemas, y ofrecen una serie de beneficios entre los que destacan los siguientes:

- Los sistemas suelen crearse a partir de objetos ya existentes, lo que conduce a un ahorro de dinero y tiempo de desarrollo, además de que el software reusado ya ha sido probado y pulido varias veces proporcionando mayor confiabilidad y calidad al sistema.
- El encapsulado oculta los detalles y hace que las clases complejas sean fáciles de utilizar. Son como cajas negras, el programador la utiliza y no ve hacia el interior, sólo debe entender su comportamiento y cómo comunicarse con ella.
- El mantenimiento se simplifica ya que un programa orientado a objetos tiene una estructura inherentemente descompuesta donde cada clase efectúa sus funciones independientemente de las demás lo que provoca menos efectos colaterales cuando se deben hacer cambios.

Existe gran variedad de métodos de diseño orientado a objetos (Ref. 24), sin embargo en el presente trabajo no se ha empleado cabalmente ninguno, en cambio, se ha tomado en cuenta puntos de algunos de ellos para crear un método propio. Su descripción es la siguiente:

- **Identificar las clases.** En una narración del problema (requisitos), los objetos candidatos corresponden con los nombres o sustantivos, en tanto que los métodos se asocian con los verbos. La decisión de incluir objetos candidato es algo subjetivo, y evaluaciones consecutivas pueden llevar a descartar o reincluir un objeto. Coad y Yourdon (Ref. 25) sugieren que para que un objeto se incluya en el modelo debe satisfacer todas (o casi todas) las características siguientes:
 1. Información retenida: el objeto candidato será útil si la información acerca de él debe recordarse para que el sistema funcione.
 2. Servicios necesarios: el objeto candidato debe tener un conjunto de operaciones que puedan manipular el valor de sus atributos.
 3. Múltiples atributos.
 4. Atributos comunes: el conjunto de atributos de la clase debe aplicarse a todos los objetos de esa clase.
 5. Operaciones comunes: el conjunto de operaciones debe ser aplicable a todos los objetos de esa clase.
 6. Requisitos esenciales: las entidades externas que aparecen en el espacio del problema y producen o consumen información son clases que casi siempre son incluidas en el modelo.
- Definir atributos y métodos. Los atributos nos permiten describir a un objeto, mientras que las operaciones o métodos definen su comportamiento y la forma en qué los primeros cambian.
- Especificar una jerarquía de clases. Existen dos tipos de relaciones que nos auxilian para llevar a cabo esta etapa, estas son conocidas coloquialmente como la relación *es-un* y la relación *tiene-un* (o *es parte-de*). Se da la relación *es-un* entre dos objetos cuando el primero es un ejemplar especializado del segundo, y cuando el segundo objeto es un componente del primero, se trata de una relación *tiene-un* (Fig. 21).

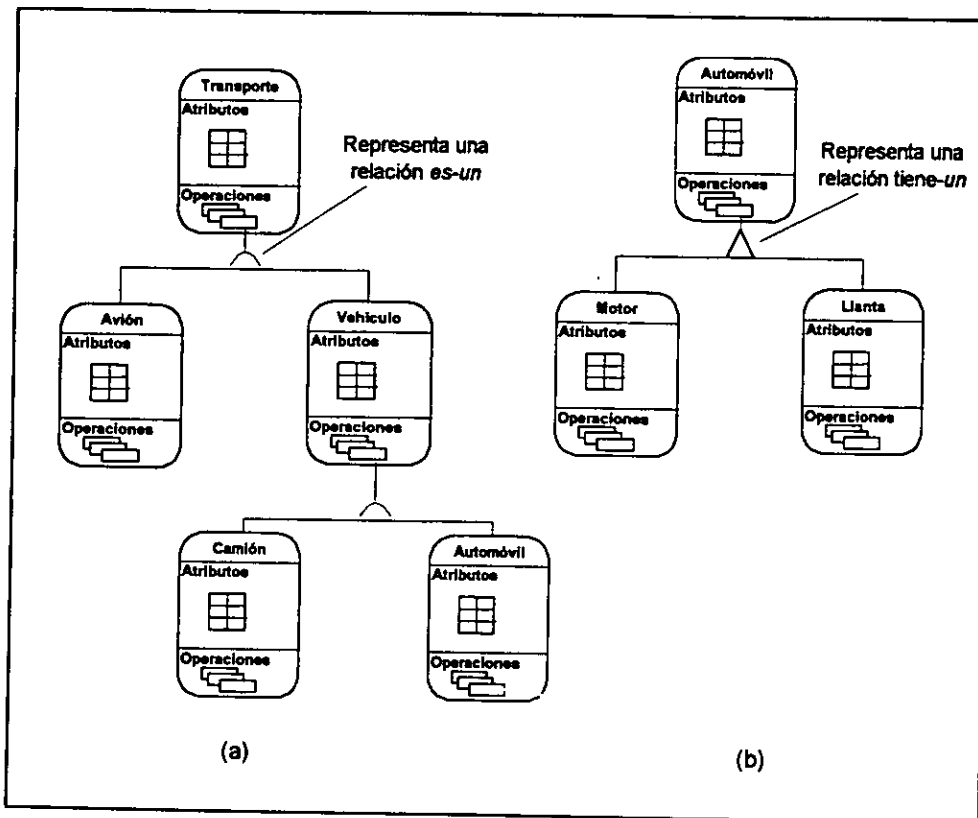


Fig. 21. Ejemplo de las relaciones *es-un* (a) y *tiene-un* (b).

- Repetir iterativamente los pasos anteriores hasta completar el modelo.

Mediante la aplicación del método descrito se definieron para el sistema ProAcel las siguientes clases:

	Clase
1	CArchivo
2	CArchivoBinario
3	CArchivoAscii
4	CGrafica
5	CEncabezado
6	CLista
7	CRenglon
8	CEjes
9	CReporte

Tabla 6. Clases de ProAcel.

La descripción en detalle de los atributos y operaciones de las clases anteriormente listadas se expone en los siguientes capítulos. Por lo pronto, la tabla 7 resume las responsabilidades de cada una de ellas, indicando cuáles son sus colaboradores (otras clases que presten los servicios necesarios para que la clase en cuestión pueda cumplir sus responsabilidades).

Clase	Responsabilidad	Colaborador
CArchivo	Selección y apertura de archivos Identificación del tipo de archivo y estado actual del proceso Conversión del formato ASA 2.0 al PBIN 1.0. Renombrar archivos	
CArchivoBinario	Ejecución de todos los cálculos numéricos involucrados tanto en el acondicionamiento, como en el procesamiento de los datos.	
CArchivoAscii	Generación de los archivos ASCII de salida (ASAP 1.0 y FTASC 1.0)	CEncabezado
CGrafica	Despliegue e impresión de gráficas lineales (aceleración, velocidad y desplazamiento) y logarítmicas (Fourier de aceleración, de velocidad, de desplazamiento, y gráficas de Función de Tránsito)	CEncabezado CEjes
CEncabezado	Despliegue e impresión de la sección de información general (datos del sismo, de la estación y del acelerograma) que aparece tanto en gráficas como en reportes Despliegue, modificación e impresión del encabezado del archivo ASA 2.0 de entrada. Generación del encabezado del archivo ASAP 1.0	CLista
CLista	Edición y actualización del encabezado del archivo ASA 2.0 de entrada	CRenglon
CRenglon	Edición del renglón seleccionado del encabezado ASA 2.0 para su modificación	
CEjes	Despliegue e impresión de los ejes (lineales o logarítmicos según sea el caso) que conforman junto con la sección de datos generales las gráficas que genera ProAcel	
CReporte	Impresión y visualización de un reporte que resume los resultados del procesamiento realizado	CEncabezado

Tabla 7. Breve descripción de las clases de ProAcel.

Por último, la figura 22 muestra las diferentes relaciones entre las clases de ProAcel.

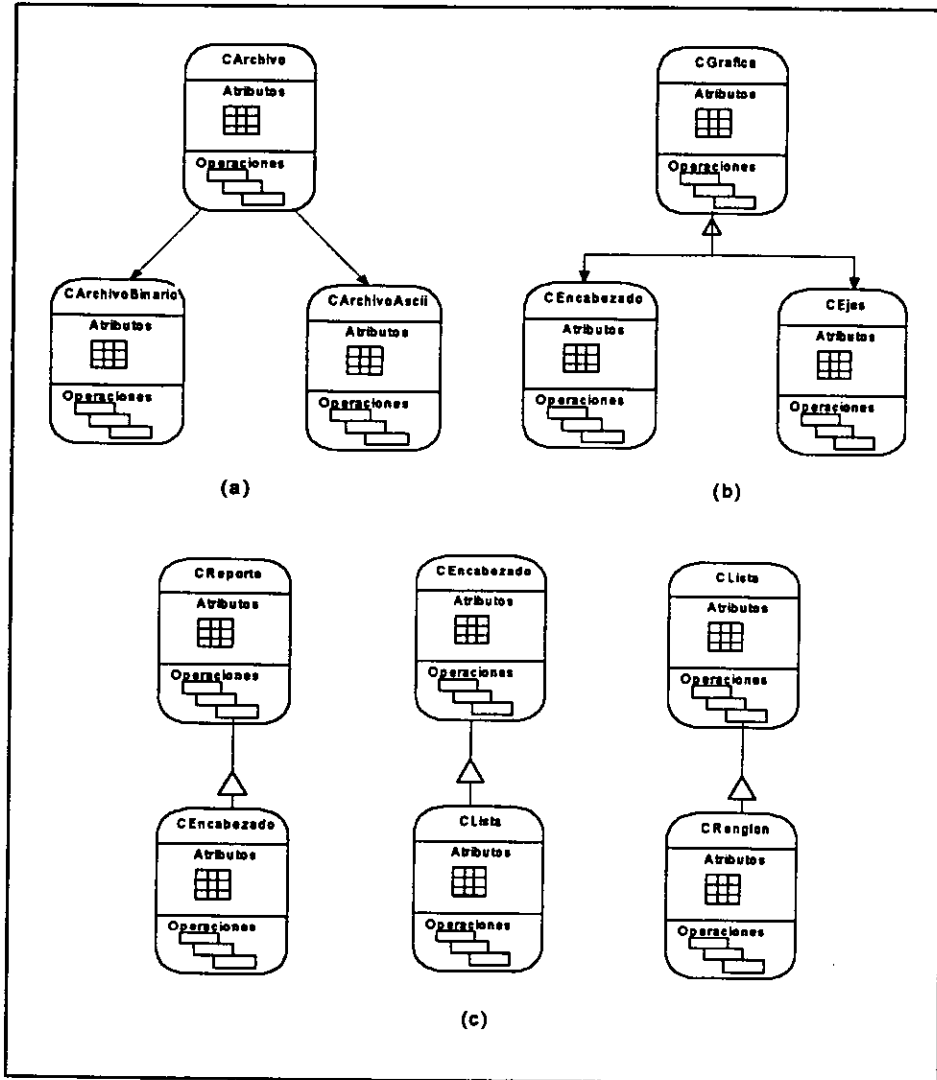


Fig. 22. Relaciones entre las clases de ProAcel.

El inciso (a) indica una relación de herencia, en la que **CArchivoBinario** y **CArchivoAscii** son subclases de **CArchivo**, por lo tanto heredan sus atributos y operaciones. Las figuras (b) y (c) son relaciones *tiene-un* e indican la composición de los objetos que se derivan de las clases, por ejemplo, un objeto de la clase **CGrafica** estará compuesto de uno de **CEncabezado** y uno de **CEjes**.

Capítulo 3

Rutinas básicas

3. RUTINAS BÁSICAS

En el presente capítulo se describen las clases involucradas en la lectura y conversión de datos, graficación, y en las rutinas de preparación o apoyo. Se describe también, en forma general, la secuencia de instrucciones de algunas de las operaciones más importantes.

3.1 Lectura y conversión de datos

Antes de que los datos numéricos del archivo ASA 2.0 de entrada estén disponibles para los comandos de ProAcel, es necesario que se encuentren en el formato binario propio del sistema descrito en el capítulo anterior con el nombre de Archivo Binario Procesado PBIN 1.0. Entre los miembros⁹ de la clase CArchivo están las funciones *Abrir* y *Convertir_a_binario*. La primera despliega una caja de diálogo que permite elegir el archivo a procesar identificando su tipo (ASA 2.0, PBIN 1.0, FTBIN 1.0, etc.), y conforme a este activa o desactiva los comandos que estén o no disponibles para la categoría identificada. La segunda función crea un archivo PBIN 1.0 con las secciones de encabezado, arreglo info y datos numéricos de aceleración, formada por tres bloques de datos que corresponden a los canales uno, dos y tres. La tabla 8 muestra los miembros restantes de la clase CArchivo.

CArchivo			
Atributos		Operaciones	
Nombre	Descripción	Nombre	Descripción
ruta_archivo	Path del archivo actual	Abrir(CString actual, CString edo_actual)	Abre el archivo seleccionado, identificando su estado y tipo.
nombre_archivo	Nombre del archivo actual	Convertir_a_binario (CString actual)	Cambia el formato del archivo ASA 2.0 y lo convierte a formato PBIN 1.0
estado	Se conforma de las letras E, C y D para indicar si el archivo presente ha sido escalado, diezmado y/o cortado	Renombrar(CString actual)	Cambia el nombre del archivo presente al indicado por el usuario
tipo_archivo	Indica el tipo de archivo de acuerdo a: 0 -> ASA 2.0 1 -> PBIN 1.0 sin Fourier 2 -> FTBIN 1.0 3 -> FTASC 1.0 4 -> PBIN 1.0 con Fourier		

Tabla 8. Atributos y operaciones de la clase CArchivo.

⁹ Término general para los atributos y operaciones asociados a una clase. A los atributos o variables se les llama datos o variables miembro, y a las operaciones funciones miembro.

La secuencia de acciones realizadas por las operaciones *Abnr* y *Convertir_a_binario* se muestran en la figura 23.

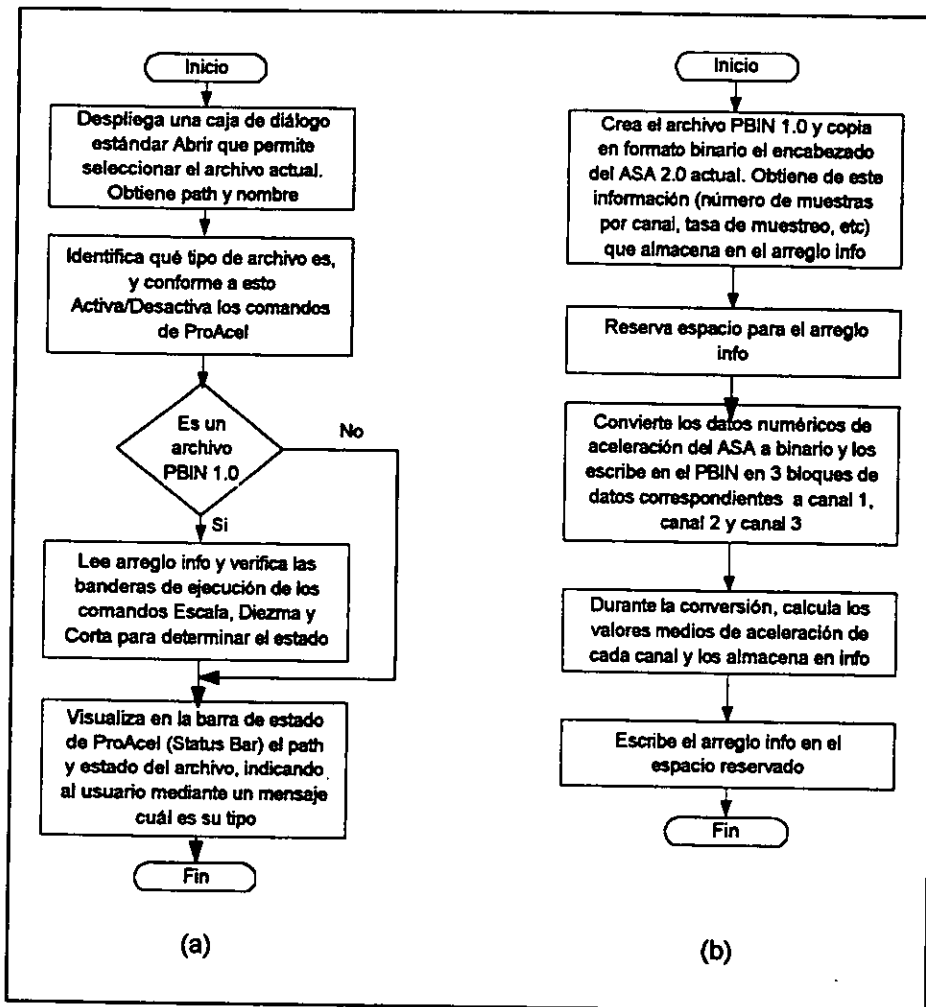


Fig. 23. Operaciones (a) Abrir y (b) Convertir_a_binario de la clase CArchivo.

Además de los datos de aceleración, un archivo PBIN 1.0 puede contar con otros segmentos dependiendo del proceso previo que se le haya realizado (Fig. 10), cada uno integrado a su vez por tres secciones correspondientes a los tres canales de registro (series de datos) contenidos en el archivo ASA 2.0. Debido a lo anterior, es muy probable que se trate de un archivo de gran tamaño que necesitaría mucho espacio para residir en memoria durante todo el procesamiento. Por esta razón, cada una de las funciones de ProAcel lee exclusivamente los datos que sean necesarios para su

ejecución, y una vez concluida esta, se encarga de la escritura de los resultados en el mismo archivo PBIN. Con esto último se pretende evitar la pérdida de la información resultante (ocasionada por el olvido del usuario por ejemplo), y al mismo tiempo englobar en un único archivo los resultados obtenidos a lo largo de todo el procesamiento.

Cada segmento de datos del Archivo Binario Procesado puede dar origen a un Archivo ASCII Procesado (ASAP 1.0). Como se vió anteriormente, el ASAP 1.0 está compuesto por una sección de encabezado y una sección numérica. La primera se produce al ejecutar la función *Encabezado_procesado_ascii* de la clase *CEncabezado*, en tanto que la segunda es generada por la operación miembro *Datos_numéricos* de *CArchivoAscii*. Una breve descripción de estas clases se presenta en las tablas 9 y 10 correspondientemente.

CEncabezado			
Atributos		Operaciones	
Nombre	Descripción	Nombre	Descripción
<i>CLista</i>	Clase derivada de la clase base <i>CDialog</i> existente en la librería de clases del Visual C++.	<i>Dibuja_patron_encabezado</i> (int salida, CDC *pDC)	Crea la plantilla del encabezado que aparece en las gráficas lineales, y logarítmicas y la envía a pantalla o impresora según se indique en los parámetros <i>salida</i> y <i>pDC</i>
<i>lineas_encab</i> [110]	Es una arreglo en el que cada uno de sus 110 elementos es una secuencia de caracteres de longitud variable	<i>Obten_datos_encabezado</i> (CString actual)	Obtiene del archivo actual la información para llenar el patrón del encabezado creado por <i>Dibuja_patron_encabezado</i> y la almacena en los atributos <i>lineas_encab</i> , <i>renjones_encab</i> y <i>datos_encab</i>
<i>renjones_encab</i> [110]	Igual que atributo anterior	<i>Llena_encabezado</i> (int salida, int tipo, CDC *pDC)	Llena el encabezado de las gráficas (lineales y logarítmicas) y lo envía a pantalla o impresora de acuerdo a los parámetros <i>salida</i> y <i>pDC</i>
<i>datos_encab</i> [23]	Arreglo de 23 elementos del mismo tipo que <i>lineas_encab</i>	<i>Encabezado_procesado_ascii</i> (CString actual, char* sección)	Crea el archivo ASAP 1.0 a partir del PBIN 1.0 incluyendo la sección de encabezado con información acorde con el tipo de datos indicado por <i>sección</i> (aceleración, velocidad, etc.)
		<i>Encabezado_FTtras</i> (CString actual, int salida, CDC *pDC)	Crea todo el encabezado (plantilla y datos) de la gráficas de Función de Tránsito y lo envía al dispositivo de salida adecuado
		<i>Encabezado_fttras_ascii</i> (CString actual)	Crea el archivo FTASC 1.0 y su sección de encabezado partir del FTBIN 1.0
		<i>Modifica_ASA</i> (CString actual)	Permite editar e imprimir la sección de encabezado del archivo ASA 2.0 actual

Tabla 9. Descripción de la clase *CEncabezado*.

CArchivoAscii	
Nombre	Operaciones
	Descripción
Datos_numericos(CString actual, char* tipo_datos)	Convierte los correspondientes datos binarios (de acuerdo al parámetro <i>tipo_datos</i>) a caracteres ASCII con el formato tipo FORTRAN indicado en la línea 80 del encabezado del archivo PBIN actual y los escribe en el archivo ASAP 1.0 de salida

Tabla 10. Descripción de la clase CArchivoAscii.

3.2 Graficación

Una gráfica está compuesta básicamente por dos partes: el encabezado y el área de despliegue de datos. La primera muestra información general acerca del sismo, de la estación de registro y algunos de los datos más importantes relacionados con el evento (número de muestras, valores máximos, etc.). El área de despliegue contiene los ejes, (lineales o logarítmicos según se requiera) y las trazas de los datos numéricos que pueden ser de aceleración, velocidad o desplazamiento, o bien sus representaciones en el dominio de la frecuencia, también conocidas como Espectros de Fourier. Estos se tratarán con mayor detalle en el capítulo correspondiente a Análisis de Fourier y cocientes espectrales. La figura 24 muestra una gráfica de aceleración hecha con ProAcel.

Dentro de los miembros de CEncabezado descritos en la tabla 9, encontramos a las funciones *Dibuja_patron_encabezado*, *Obten_datos_encabezado* y *Llena_encabezado* que se encargan del despliegue en pantalla o impresión de la primer componente de la gráfica. La clase CEjes contiene a *Dibuja_lineales* que imprime o visualiza los ejes, y, CGrafica con su función *Traza_lineal* es la responsable de graficar, en pantalla o en impresora, los datos numéricos. Las tablas 11 y 12 definen a grandes rasgos las clases CGrafica y CEjes.

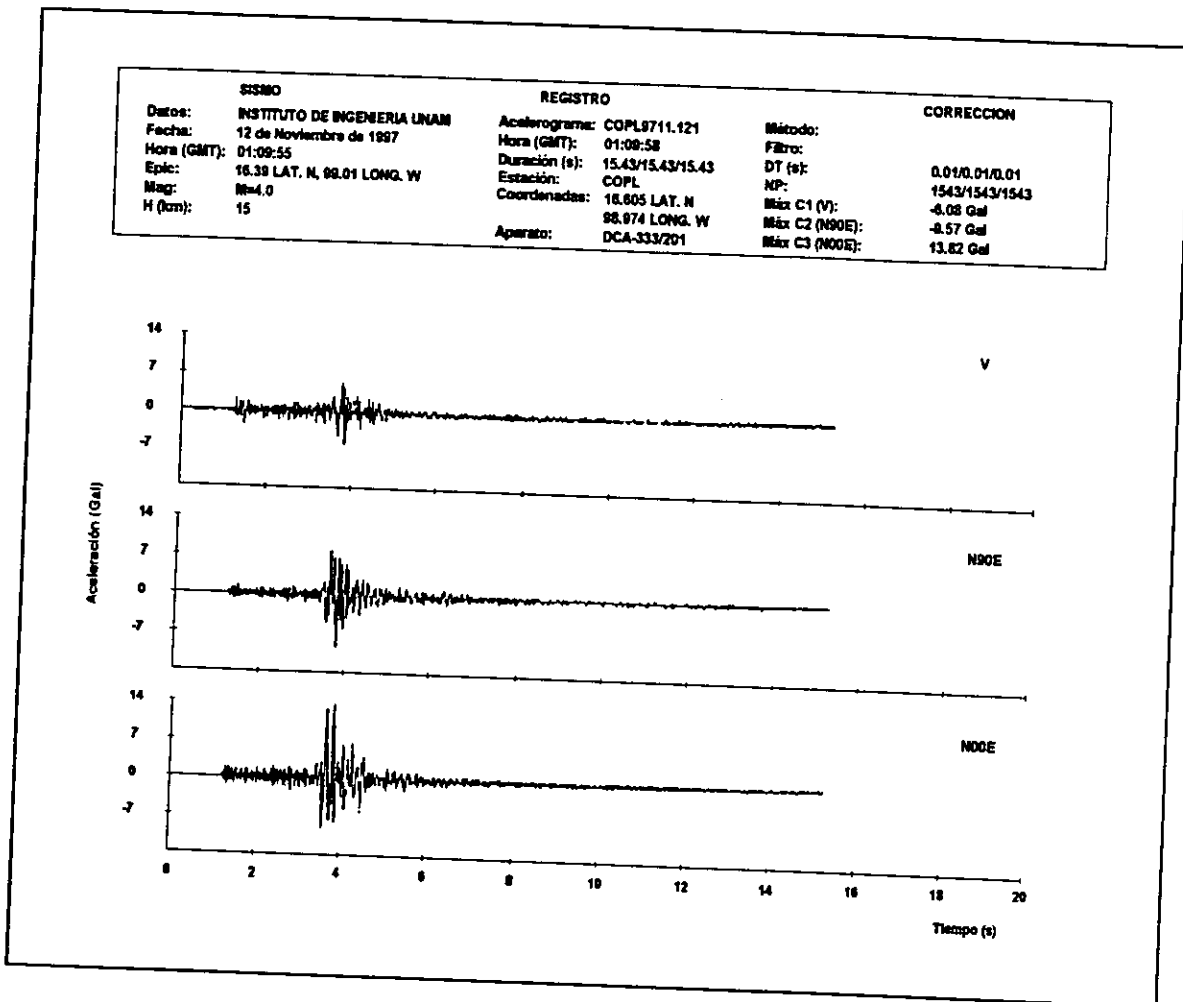


Fig. 24. Gráfica elaborada con ProAcel.

CGrafica	
Nombre	Operaciones
Traza_lineal(CString actual, char *tipo, int salida, CDC *pDC)	Grafica los datos de aceleración, velocidad o desplazamiento de acuerdo al parámetro tipo, enviándolos al dispositivo de salida adecuado
Traza_logaritmica_pantalla(CString actual, char *tipo, CDC *pDC, float amplitud, float frecuencia)	Grafica los datos de Fourier indicados en tipo y los despliega en pantalla
Traza_logaritmica_impreso(CString actual, char *tipo, CDC *pDC, float amplitud, float frecuencia)	Grafica los datos de Fourier indicados en tipo y los envía a impresora

Tabla 11. Descripción de la clase CGrafica (no tiene atributos).

CEjes			
Atributos		Operaciones	
Nombre	Descripción	Nombre	Descripción
frecuencia	Es el límite superior del eje de frecuencia de la gráfica logarítmica	Dibuja_lineales(CString actual, char *tipo, int salida, CDC *pDC)	Dibuja los ejes de una gráfica lineal y los envía a pantalla o impresora según se requiera
amplitud	Es el límite superior del eje de amplitud de la gráfica logarítmica	Dibuja_logarítmicos(CString actual, char *tipo, int salida, CDC *pDC)	Dibuja las líneas que formarán los ejes logarítmicos y la graduación del de frecuencia.
		Dibuja_log_ampl_pantalla(CString actual, char *tipo, CDC *pDC)	Hace las graduaciones del eje de amplitud de una gráfica logarítmica en pantalla
		Dibuja_log_ampl_imprreso(CString actual, char *tipo, CDC *pDC)	Hace las graduaciones del eje de amplitud y las imprime

Tabla 12. Descripción de la clase CEjes.

La función *Traza_lineal* se presenta en la siguiente figura.

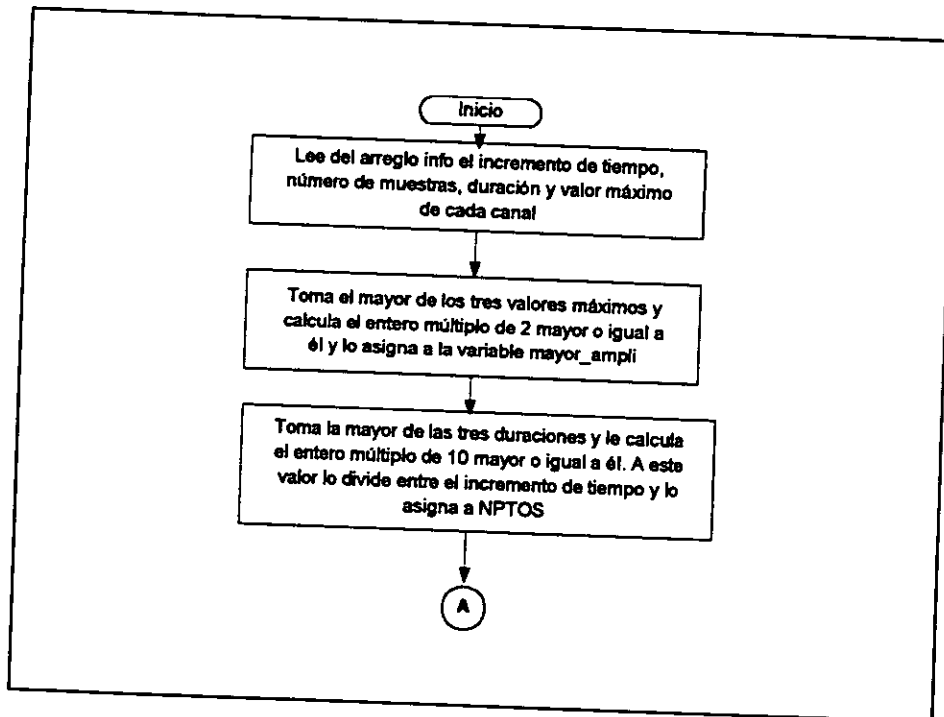


Fig. 25. Operación Traza_lineal.

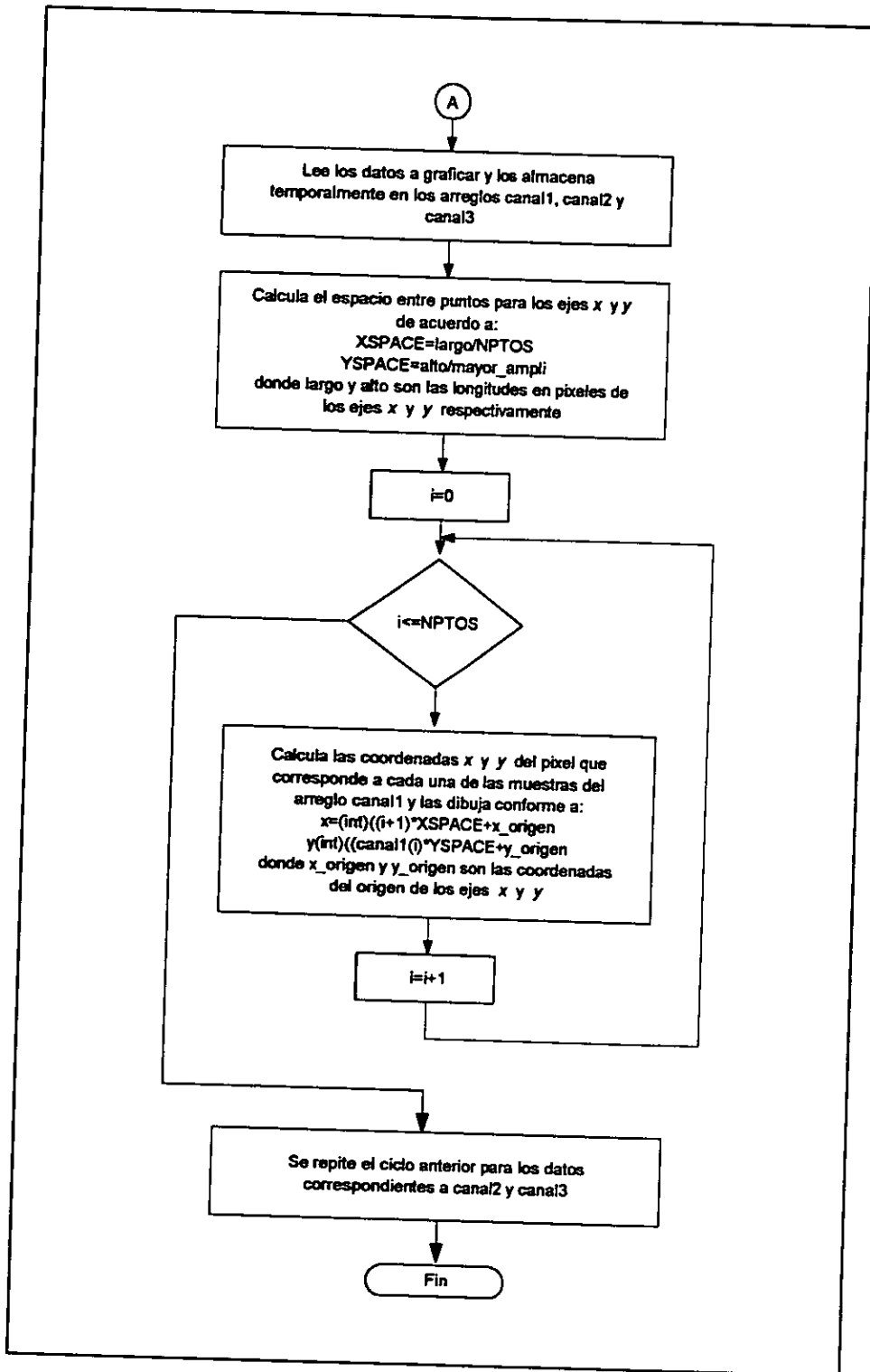


Fig. 25. (Continuación).

3.3 Tareas de apoyo

En ocasiones resulta conveniente adecuar los datos antes de continuar con el procesamiento, por tal motivo para acondicionar la información de acuerdo a las necesidades particulares del usuario, ProAcel incluye una serie de acciones tales como Cortar, Diezmar, multiplicar por un escalar, etc.

La clase CArchivoBinario cuenta con funciones miembro encargadas de ejecutar los comandos que se describen en la tabla 13.

CArchivoBinario			
Atributos		Operaciones	
Nombre	Descripción	Nombre	Descripción
CCorta	Clase derivada de la clase CDialog perteneciente a la librería de Visual C++. Mantiene la información de tiempo inicial y final empleada en la función Cortar	Cortar(CString actual, float tiempo_i, float tiempo_f)	Corta el acelerograma de tiempo_i hasta tiempo_f. Los datos desechados, incluyendo los que no son de aceleración no pueden recuperarse. Los tiempos de corte son los mismos para los tres canales.
CDiezma	Subclase de CDialog cuya responsabilidad es mantener los factores de diezmado que se usarán en la operación Diezmar	Diezmar(float FD1, float FD2, float FD3, CString actual)	Toma una de cada dos, tres o cuatro muestras (de acuerdo al factor de diezmado FD) de la señal de aceleración eliminando las demás. Es posible aplicar diferentes factores de diezmado a cada canal. Los datos eliminados, incluyendo los que no sean de aceleración, no son recuperables.
CEscala	Clase hija de CDialog. Conserva los factores de escala necesarios para realizar la operación Escalar	Escalar(float FE1, float FE2, float FE3, CString actual)	Multiplica los datos de aceleración por un factor de escala (FE). Cada canal puede escalarse por un factor diferente. Los datos de velocidad, desplazamiento y los de Fourier son eliminados al ejecutar esta función
CÍntegra	Subclase de CDialog. Obtiene la velocidad y desplazamiento iniciales que se emplearán en la función Integrar	Integrar(CString actual, float vel_ini, float desp_ini)	Integra los datos de aceleración para obtener velocidad y desplazamiento.
CCalculaFFT	Se deriva de la clase CDialog y mantiene el tipo de dato (aceleración, velocidad o desplazamiento) con el que se hará el cálculo de la FFT y el factor de normalización que se utilizará	Restar_media(CString actual)	Obtiene el promedio aritmético de los datos de aceleración, restándolo a cada uno de ellos.
		Realizaft(float *info, float *huge* auxiliar, int quecanal, int quedato, float factor)	Calcula la Transformada Rápida de Fourier. Emplea el factor de normalización indicado por el parámetro factor. Puede realizar el cálculo con datos de aceleración, velocidad o desplazamiento según lo indique el parámetro quedato

Tabla 13. Descripción de la clase CArchivoBinario.

CArchivoBinario			
Atributos		Operaciones	
Nombre	Descripción	Nombre	Descripción
		Suavizafft(float dt, long muestras, float _huge *auxiliar, int quedato, int canal, float *info, float _huge *suave)	Filtra los datos obtenidos con Realizafft.
		Cociente_espectral(int quedatos CString numerador, CString denominador, CString resultados)	Ejecuta una división punto a punto entre los datos correspondientes (FFT aceleración, FFT velocidad y FFT desplazamiento) de los archivos numerador y denominador

Tabla 13. (Continuación).

En cuanto a Renombrar un archivo, su implementación es una función miembro de la clase CArchivo (tabla 8) y como su nombre lo indica, permite cambiar el nombre de un archivo. Puede usarse para mover uno, de un subdirectorio a otro, pero no de un dispositivo a otro (por ejemplo del drive A al B).

Uno de los comandos más utilizados es el denominado Diezmar, el cual básicamente, consiste en tomar una de cada dos, tres o cuatro muestras de la señal tiempo-aceleración. Los datos desechados no son recuperables a menos que se vuelva a leer y convertir el archivo ASA original. También se eliminan los datos de velocidad y desplazamiento, así como los de Fourier de aceleración, velocidad y desplazamiento en caso de existir. La figura siguiente muestra la secuencia de pasos de la función miembro *Diezmar* de CArchivoBinario.

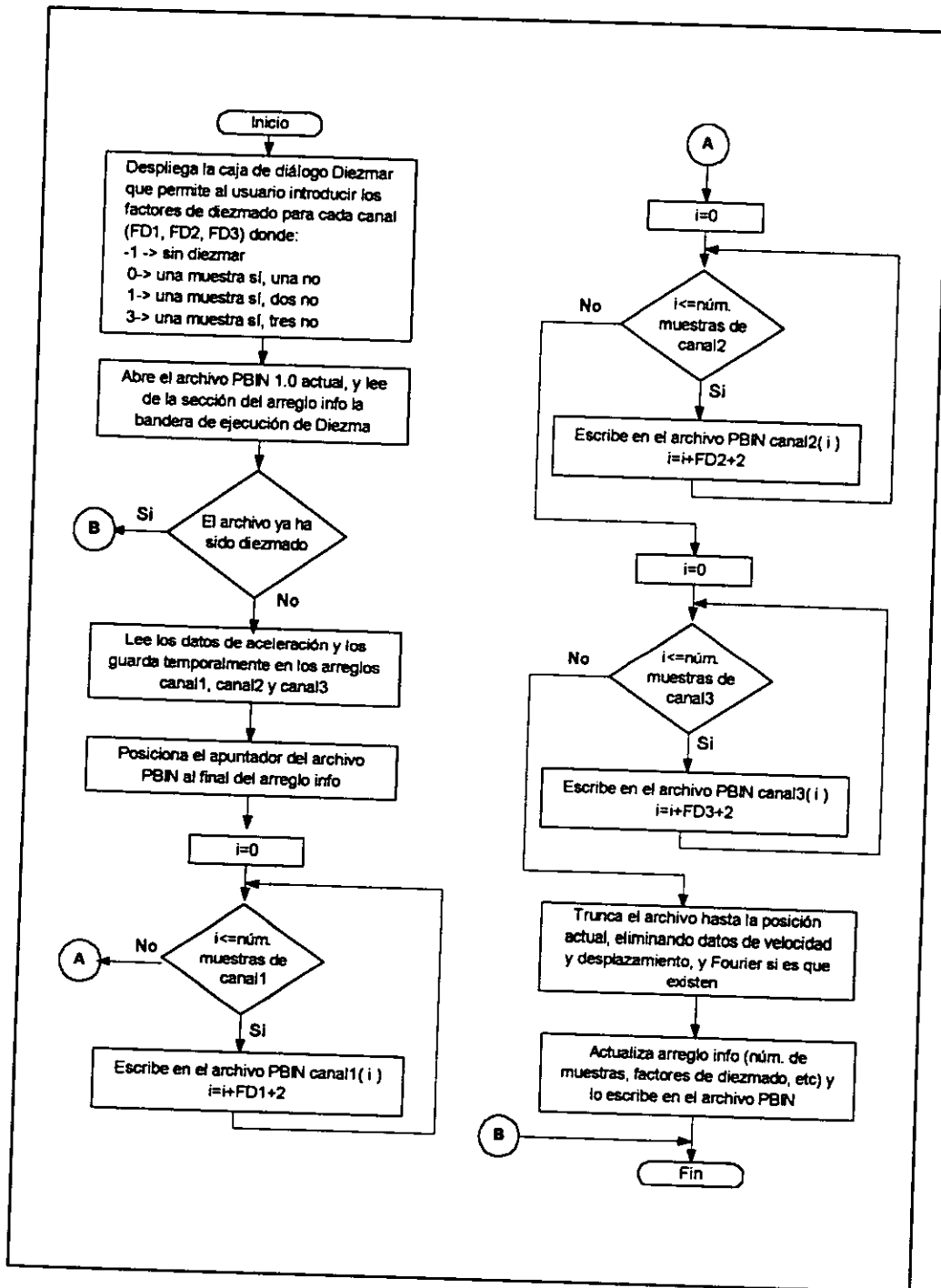


Fig. 26. Función Diezmar.

Por último se tiene el comando Reporte, con el cual se resume la historia del procesamiento realizado al archivo actual y algunos de los resultados más representativos. Está dividido en cuatro secciones, la primera es igual a la sección de encabezado descrita para el caso de las gráficas y la información que contiene se refiere al acelerograma original, esto es, antes de la conversión al formato PBIN 1.0. La segunda, muestra el incremento de tiempo, el número de puntos, los valores máximos y las muestras de ocurrencia, referentes a cada canal, y de datos de aceleración, velocidad y desplazamiento. La tercera sección expone el incremento en frecuencia, el número de muestras, el factor de suavizado, el factor de normalización, las amplitudes máximas y las muestras de ocurrencia para los datos de Fourier de aceleración, de velocidad y de desplazamiento. La última parte contiene los valores empleados por el usuario en la ejecución de los comandos Media, Escalar, Diezmar, Cortar e Integrar. La figura 27 muestra un reporte generado con ProAcel.

SISMO		REGISTRO		DATOS ORIGINALES	
Datos:	INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM	Acelerograma:	COPL9711.121	Método:	
Fecha:	12 de Noviembre de 1997	Hora (GMT):	01:09:58	Filtro:	
Hora (GMT):	01:09:55	Duración (s):	15.43/15.43/15.43	DT (s):	0.01/0.01/0.01
Epío:	16.39 LAT. N. 99.01 LONG. W	Estación:	COPL	NP:	1543/1543/1543
Mag:	M=4.0	Coordenadas:	16.605 LAT. N 98.974 LONG. W	Máx. C1 (V):	-6.08 Gal
H (dm):	15	Aparato:	DCA-333/201	Máx. C2 (NOE):	-0.57 Gal
				Máx. C3 (NOE):	13.82 Gal
Datos sin corregir					
	Aceleración	Velocidad	Desplazamiento		
DT (s):	0.01/0.01/0.01	0.01/0.01/0.01	0.01/0.01/0.01		
NP:	1543/1543/1543	1543/1543/1543	1543/1543/1543		
Máximo C1:	-6.06857	-0.127147	-0.486813		
En la muestra:	381	370	1377		
Máximo C2:	-0.5813	0.263907	0.144179		
En la muestra:	378	374	632		
Máximo C3:	13.7525	-0.38529	0.851769		
En la muestra:	381	362	891		
Datos de Fourier sin corregir					
	Aceleración	Velocidad	Desplazamiento		
DF:	0.0488/0.0488/0.0488	---	---		
NP:	1025/1025/1025	---	---		
FS:	1/3 de octava	---	---		
FN:	Sísmico	---	---		
Ampl. máx. C1:	0.0750951	---	---		
En la muestra:	114	---	---		
Ampl. máx. C2:	0.1191125	---	---		
En la muestra:	105	---	---		
Ampl. máx. C3:	0.207807	---	---		
En la muestra:	151	---	---		
Media					
vm1:	-0.01143	vm2:	-0.00870	vm3:	0.06745
Escala					
FE1:	---	FE2:	---	FE3:	---
Diezma					
FD1:	---	FD2:	---	FD3:	---
Corta					
Ti (s):	---	Tf (s):	---		
Integra					
VI:	0	DI:	0		

Fig. 27. Reporte de ProAcel.

La clase **CReporte** es la responsable de generar las secciones dos, tres y cuatro, la de encabezado se obtiene de igual manera que para el caso de las gráficas previamente descritas. La descripción de **CReporte** se presenta a continuación:

CReporte			
Atributos		Operaciones	
Nombre	Descripción	Nombre	Descripción
CEncabezado	Clase de ProAcel. Para más detalles ver tabla 9 del presente trabajo	Dibuja_patron_reporte (int salida, CDC *pDC)	Crea la plantilla de un reporte, y la imprime o despliega en pantalla conforme a los parámetros <i>salida</i> y <i>pDC</i>
		Llena_reporte(char *actual, int salida, CDC *pDC)	Obtiene del archivo actual la información desplegada en un reporte y llena el formato hecho por la función <i>Dibuja_patron_reporte</i> . Envía la información al dispositivo de salida indicado por <i>salida</i> y <i>pDC</i>

Tabla 14. Clase CReporte.

Capítulo 4

Análisis de Fourier

4. ANÁLISIS DE FOURIER

Desde que su autor Jean Baptiste Joseph Fourier la definió, la transformada de Fourier ha sido durante mucho tiempo una de las técnicas más empleadas para el análisis de señales. A partir de ese momento, las áreas en las cuales se ha utilizado han ido aumentando y en la actualidad se emplea en una gran variedad de disciplinas como los sistemas lineales, los estudios de antenas, la óptica, el modelado de procesos aleatorios, la teoría de probabilidades y la física cuántica entre muchas otras.

Hoy en día se dispone de varios métodos para aplicar la teoría de Fourier y los cuales dependen del tipo de señal que se considere, por ejemplo, la serie de Fourier se emplea en el estudio de señales periódicas, permitiendo representarlas en términos de un conjunto de ondas senoidales relacionadas armónicamente. Si por el contrario, la señal no es periódica, se acostumbra usar la transformada de Fourier para representarla. Cualquiera que sea el caso, mediante este tipo de análisis se obtiene una descripción de la señal en el dominio de la frecuencia, lo que hace posible distinguir características importantes de esta. En el caso de un registro sísmico en el cual se reflejan las amplitudes de la aceleración en el dominio del tiempo, se pueden precisar algunos parámetros tales como: la duración total del registro así como la correspondiente a su parte más intensa, el valor de aceleración máxima y los tiempos de arribo de las ondas de cuerpo y superficiales; de hecho esta representación de la señal en el dominio del tiempo es muy útil para determinar la localización epicentral del temblor y su magnitud. No obstante lo anterior, existe en la misma señal información muy valiosa que no puede ser analizada si esta se encuentra definida en el dominio del tiempo, por ejemplo no se puede establecer a que frecuencias se presentaron las mayores amplitudes del movimiento, tampoco se puede precisar si existe un valor de la frecuencia en el cual se defina un máximo en amplitud que destaque sobre el resto de la señal. Para poder realizar un estudio de la señal sísmica con relación a las situaciones planteadas se tiene que recurrir a una transformación del dominio de la señal, en este caso el tiempo, al dominio de la frecuencia y para ello es necesario recurrir al análisis de Fourier.

En el presente capítulo se hace una breve descripción del marco en que está basada la teoría de la transformada de Fourier, así como el algoritmo de cálculo denominado Transformada Rápida de Fourier (FFT) y que fue utilizado para la implementación de la rutina correspondiente del sistema ProAcel.

4.1. Serie de Fourier

Si $y(t)$ representa una función periódica es decir, $y(t)=y(t+nT)$ donde T representa el período, mediante un desarrollo en serie de Fourier es posible descomponerla en una suma infinita de términos senoidales y cosenoidales para expresarla como (Ref. 26):

$$y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi nft) + b_n \text{sen}(2\pi nft)] \quad (4.1)$$

donde $f=1/T$ y a_0 , a_n y b_n están dados por:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(t) dt \quad (4.2)$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(t) \cos(2\pi nft) dt \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (4.3)$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(t) \text{sen}(2\pi nft) dt \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (4.4)$$

Otra forma de expresar la serie de Fourier de la ecuación 4.1 es empleando las exponenciales complejas:

$$\cos(2\pi nft) = \frac{1}{2} (e^{j2\pi nft} + e^{-j2\pi nft}) \quad (4.5)$$

y

$$\text{sen}(2\pi nft) = \frac{1}{2j} (e^{j2\pi nft} - e^{-j2\pi nft}) \quad (4.6)$$

Se obtiene así:

$$y(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n - jb_n) e^{j2\pi nft} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n + jb_n) e^{-j2\pi nft} \quad (4.7)$$

La representación de una señal periódica mediante una serie de Fourier equivale a descomponerla en sus diversos componentes armónicos, así encontramos que una señal periódica $y(t)$ con período T tiene componentes de frecuencias $0, \pm f, \pm 2f, \pm 3f, \pm 4f, \dots$. La extensión de las series de Fourier a funciones no periódicas conduce a expresiones integrales que se conocen como transformada de Fourier.

4.2 Transformada de Fourier

En general, una transformación se emplea con el propósito de simplificar la solución de un problema, tal es el caso de la transformada de Fourier, que permite "transformar" el dominio de la función. Para una serie de tiempo la variable independiente definida de $-\infty$ a ∞ puede ser transformada al dominio de la frecuencia, también en el intervalo de $-\infty$ a ∞ . La figura 28 ilustra una forma sencilla de interpretar la transformada de Fourier.

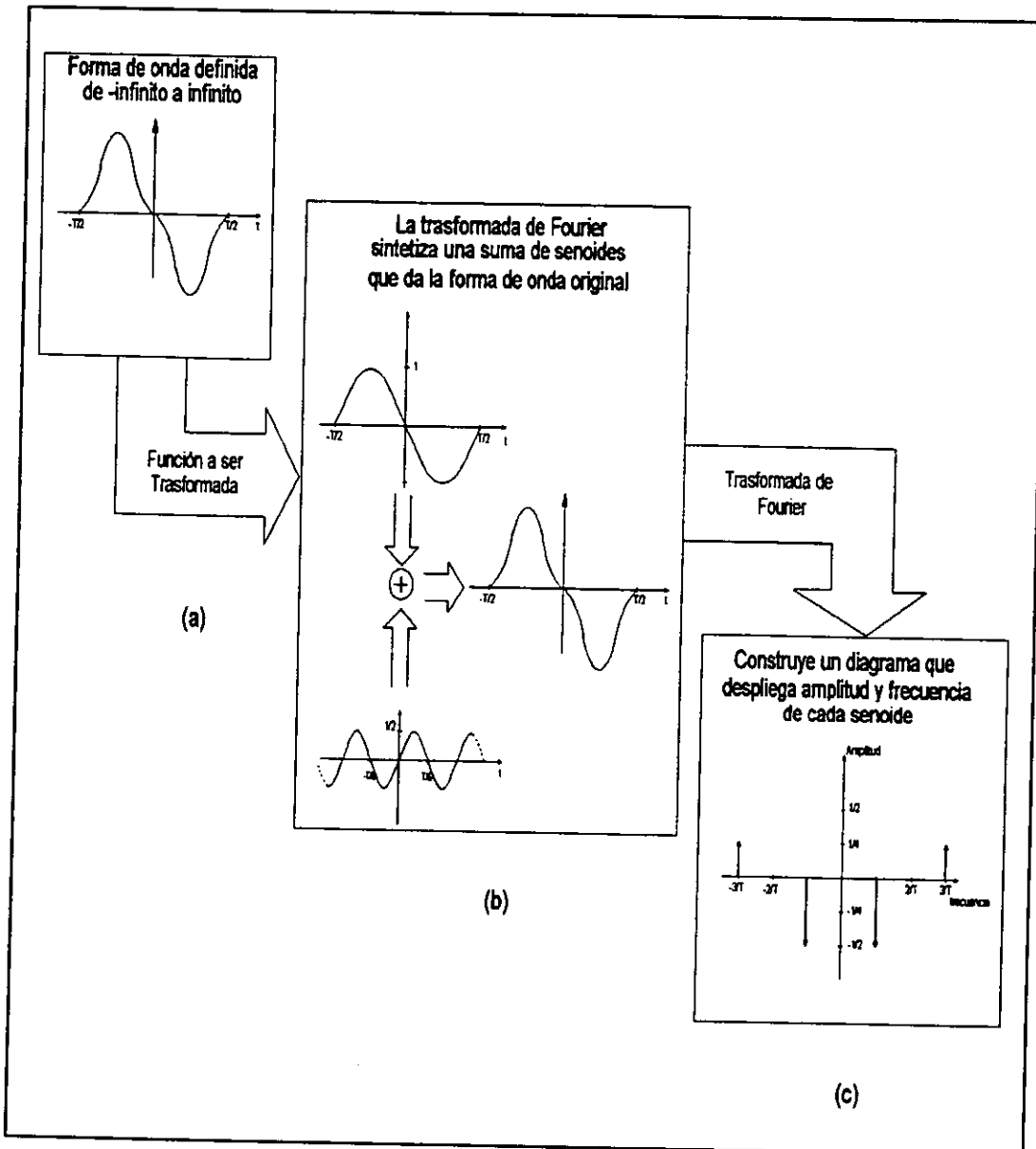


Fig. 28. Interpretación de la transformada de Fourier.

Como puede observarse, la esencia de la transformada de Fourier es descomponer una señal, ejemplificada en el inciso (a), en una suma de senoides de diferentes frecuencias. Si la suma de estas senoides es la forma de la señal original, entonces se ha determinado su transformada de Fourier (inciso (b)), cuya representación gráfica es un diagrama que despliega la amplitud y la frecuencia de cada una de las senoides determinadas como lo muestra el inciso (c).

Esto es, la transformada de Fourier es una representación en el dominio de la frecuencia de la señal. Su expresión matemática es (Ref. 27):

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.8)$$

donde $h(t)$ es la señal a ser descompuesta en una suma de senoides y $H(f)$ es la transformada de Fourier de $h(t)$, $j = \sqrt{-1}$ y $2\pi f = \omega$. En general, la transformada de Fourier es una cantidad compleja:

$$H(f) = R(f) + jI(f) = |H(f)| e^{j\theta(f)} \quad (4.9)$$

donde $R(f)$ es la parte real de la transformada, $I(f)$ la imaginaria, $|H(f)|$ es la amplitud o espectro de Fourier de $h(t)$ y está dado por $\sqrt{R^2(f) + I^2(f)}$ y $\theta(f)$ es el ángulo de fase, de donde:

$$\theta(f) = \tan^{-1} \left[\frac{I(f)}{R(f)} \right]$$

La ecuación

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f) e^{j2\pi ft} df \quad (4.10)$$

se conoce como transformada inversa de Fourier de $H(f)$. Las ecuaciones 4.8 y 4.10 se dice que constituyen un par de transformadas de Fourier.

4.3 Transformada Discreta de Fourier

La forma discreta de la transformada de Fourier permite su empleo en computadoras digitales. Para ello, se requiere en primer lugar, que la señal sea discreta. Si no lo es, el primer paso en el proceso es realizar un muestreo uniforme de la señal $x(t)$ con la finalidad de obtener una sucesión finita de muestras que podemos expresar como $x(0)$, $x(T_s)$, $x(2T_s)$, $x(3T_s)$, ..., $x(NT_s - T_s)$ donde T_s es el período de muestreo y N es el número de muestras. Para una correcta representación de la señal, la razón de muestreo $1/T_s$ debe ser igual o mayor que el doble de la componente de frecuencia más alta de la señal (Ref. 28). Una vez que la señal esté en forma de una sucesión de muestras, se puede definir la transformada discreta de Fourier como sigue (Ref. 29):

$$X\left(\frac{n}{NT_s}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} x_0(kT_s) e^{-j2\pi nk/N} \quad n=0,1,\dots, N-1 \quad (4.11)$$

De la ecuación anterior se observa que la transformada discreta de Fourier es también una sucesión de N muestras con separación en frecuencia de F_s hertz entre sí. La transformada discreta inversa de Fourier está definida como:

$$x_0(kT_s) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X\left(\frac{n}{NT_s}\right) e^{j2\pi nk/N} \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (4.12)$$

La forma discreta ofrece un método potencial para solucionar problemas empleando la computadora. Sin embargo, un examen cuidadoso de la ecuación 4.11 muestra que si la función consta de N muestras y si se desea encontrar la amplitud de N senoides, se necesitan $N \cdot N$ multiplicaciones para llevar a cabo el cálculo. Si N es grande, el tiempo de proceso requerido es excesivo. Con el propósito de solucionar este inconveniente se desarrollaron técnicas para disminuir el tiempo de proceso requerido. En 1965 Cooley y Tukey publicaron un algoritmo matemático conocido como transformada rápida de Fourier (FFT). Con este, el tiempo de proceso requerido es proporcional a $N \log_2 N$ multiplicaciones. Este ahorro en el tiempo de cómputo ha revolucionado totalmente muchos aspectos del análisis científico.

4.4 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La transformada rápida de Fourier es un algoritmo para calcular la transformada discreta de Fourier, entendiéndose por algoritmo un método específico para ejecutar una serie de operaciones. En este apartado se pretende describir tal algoritmo desde el punto de vista computacional.

Considere la transformada discreta de Fourier:

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_0(k) e^{-j2\pi nk/N} \quad n=0, 1, \dots, N-1 \quad (4.13)$$

donde se ha reemplazado kT por k y n/NT por n por conveniencia de notación. Si por ejemplo se tiene $N=4$ y haciendo $W = e^{-j2\pi/N} \Rightarrow W^{nk} = e^{-j2\pi nk/N}$, entonces la ecuación 4.13 puede escribirse como:

$$\begin{aligned} X(0) &= x_0(0)W^0 + x_0(1)W^0 + x_0(2)W^0 + x_0(3)W^0 \\ X(1) &= x_0(0)W^0 + x_0(1)W^1 + x_0(2)W^2 + x_0(3)W^3 \\ X(2) &= x_0(0)W^0 + x_0(1)W^2 + x_0(2)W^4 + x_0(3)W^6 \\ X(3) &= x_0(0)W^0 + x_0(1)W^3 + x_0(2)W^6 + x_0(3)W^9 \end{aligned}$$

o en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Más compactamente:

$$X(n) = W^{nk} x_0(k)$$

Inspeccionando la ecuación 4.14 se observa que W y probablemente $x_0(k)$ son complejos, entonces N^2 multiplicaciones y $(N)(N-1)$ sumas complejas se necesitan para realizar la operación matricial. La FFT debe su éxito al hecho de que el algoritmo reduce el número de multiplicaciones y sumas requeridas.

Para ilustrar la FFT es conveniente elegir el número muestras de $x_0(k)$ de acuerdo a la relación $N = 2^r$ donde r es un entero.

El primer paso en el desarrollo de la FFT para el ejemplo es reescribir 4.14 como

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W^1 & W^2 & W^3 \\ 1 & W^2 & W^0 & W^2 \\ 1 & W^3 & W^2 & W^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

La matriz de la ecuación 4.15 se derivó usando la relación $W^{nk \bmod N}$ donde $nk \bmod N$ es el residuo de la división nk / N . El segundo paso en el desarrollo es factorizar la matriz cuadrada como sigue:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Como puede verse, la multiplicación de las dos matrices cuadradas de la ecuación 4.16 produce la matriz 4.15 con la excepción de que los renglones 1 y 2 están intercambiados, por lo que:

$$\begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_1(1) \\ x_1(2) \\ x_1(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0(0) \\ x_0(1) \\ x_0(2) \\ x_0(3) \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Esto es, el vector columna $x_1(k)$ es igual al producto de las dos matrices de la derecha en la ecuación 4.16. El elemento $x_1(0)$ se calcula con una multiplicación y una suma complejas:

$$x_1(0) = x_0(0) + x_0(2)W^0$$

$x_1(1)$ también se calcula con una multiplicación y una suma complejas. Solo una suma se requiere para calcular $x_1(2)$ ya que $W^0 = -W^2$, por lo que:

$$x_1(2) = x_0(0) + W^2 x_0(2) = x_0(0) - W^0 x_0(2)$$

$W^0 x_0(2)$ ya había sido calculado para determinar $x_1(0)$. Para el caso de $x_1(3)$, el vector intermedio $x_1(k)$ se determina entonces con cuatro sumas y dos multiplicaciones complejas.

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2(0) \\ x_2(1) \\ x_2(2) \\ x_2(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_1(1) \\ x_1(2) \\ x_1(3) \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$x_2(0)$ se calcula con una multiplicación y una suma complejas:

$$x_2(0) = x_1(0) + x_1(1)W^0$$

$x_2(1)$ se calcula con una suma puesto que, $W^0 = -W^2$, $x_2(2)$ es determinado por una multiplicación y una suma complejas y $x_2(3)$ por sólo una suma. De este modo, para calcular el vector

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix}$$

se requieren cuatro multiplicaciones y ocho sumas complejas, en tanto que, el cálculo de $X(n)$ por medio de la ecuación 4.14 necesita 16 multiplicaciones y 12 sumas complejas. Debe notarse que al factorizar la matriz se introducen ceros en esta, y como resultado, se reduce el número de multiplicaciones requeridas. Para $N = 2^r$, el algoritmo de la FFT es simplemente un procedimiento para factorizar una matriz de $N \times N$ en r matrices (cada una de $N \times N$), de tal forma que cada una tenga la propiedad especial de minimizar el

número de operaciones. Si se extiende el resultado del ejemplo anterior, se encuentra que la FFT requiere $N_T/2 = 4$ multiplicaciones y $N_T = 8$ sumas, donde el método de la ecuación 4.14 necesita N^2 multiplicaciones y $N(N-1)$ sumas.

El proceso de factorización de la matriz introduce una discrepancia, esto es,

$$\text{se produce } \begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix} \text{ en lugar de } \begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix}$$

Este rearrreglo es inherente al proceso de factorización de la matriz y es un problema menor por que se puede generalizar una técnica para reordenar el vector. Si reemplazamos el argumento n con su equivalente binario, e invertimos los *bits* se tiene que:

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(2) \\ X(1) \\ X(3) \end{bmatrix} \text{ se vuelve } \begin{bmatrix} X(00) \\ X(10) \\ X(01) \\ X(11) \end{bmatrix} \text{ y después de la inversión se convierte en } \begin{bmatrix} X(00) \\ X(01) \\ X(10) \\ X(11) \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Para N mayor que 4 es difícil describir la factorización de la matriz en forma similar al ejemplo anterior, por eso, el proceso se explicará en forma gráfica.

Para empezar, se expresa la ecuación 4.16 en términos gráficos como se ilustra en la figura 29. El vector $x_0(k)$ se representa por una columna vertical de nodos en la parte izquierda de la gráfica. El segundo arreglo vertical de nodos es el vector $x_1(k)$ calculado en 4.17 y el siguiente arreglo corresponde al vector $x_2(k)$ de la ecuación 4.18, en general deben ser γ arreglos verticales donde $N = 2^\gamma$. La gráfica se interpreta como sigue: a cada nodo entran dos líneas sólidas representando caminos de transmisión desde nodos previos. Un camino trae una cierta cantidad desde un nodo en un arreglo, multiplica la cantidad por W^P e introduce el resultado en un nodo del siguiente arreglo. El factor W^P aparece cerca de la punta de flecha del camino de transmisión, su ausencia implica que $W^P = 1$. Los resultados que entran a un nodo desde dos caminos de transmisión se suman.

Para ilustrar la interpretación de la gráfica considere el nodo $x_1(2)$, de acuerdo a las reglas de interpretación $x_1(2) = x_0(0) + W^2 x_0(2)$. Cada nodo se expresa de forma similar. Esta gráfica es un método conciso para representar los cálculos requeridos en la factorización de la matriz del algoritmo FFT de la ecuación 4.16. Cada columna de la gráfica corresponde a una matriz factorizada, γ arreglos verticales de N puntos cada uno ($N = 2^\gamma$) son requeridos. El empleo de esta representación gráfica nos permite describir el proceso de factorización para N grande de una forma sencilla.

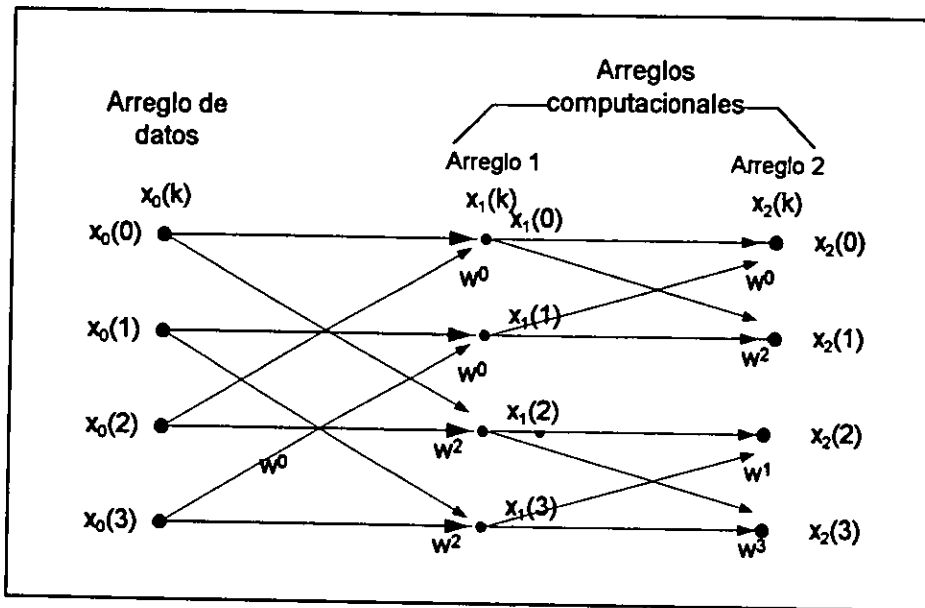


Fig. 29. Gráfica de flujo de señal de la FFT, $N=4$.

La figura 30 muestra el flujo de señal para $N=16$, a partir del cual se desarrollan propiedades generales sobre el proceso de factorización de la matriz. Estas propiedades sirven de punto de partida para desarrollar el diagrama de flujo de la FFT.

Al inspeccionar dicha figura encontramos que en cada arreglo hay dos nodos cuyos caminos de transmisión de entrada parten del mismo par de nodos en el arreglo previo. Por ejemplo, los nodos $x_1(0)$ y $x_1(8)$ son calculados en términos de $x_0(0)$ y $x_0(8)$, note que estos últimos no intervienen en el cálculo de otros, y se les conoce como par de nodos duales. Dada la independencia para determinar un par de nodos duales es posible ejecutar un cálculo "en lugar de". De acuerdo a la figura 30 se pueden calcular simultáneamente $x_1(0)$ y $x_1(8)$ en términos de $x_0(0)$ y $x_0(8)$ y regresar el resultado a las localidades de almacenamiento previamente ocupadas por $x_0(0)$ y $x_0(8)$, el único requisito es entonces el arreglo original de datos.

Para conocer el espacio (medido verticalmente en términos del índice k) entre un par de nodos duales se tiene, en primer lugar, que para el arreglo $l=1$ la separación es de $k=8=N/2^1=16/2^1$. Para el arreglo $l=2$, por ejemplo, $\{x_2(8), x_2(12)\}$ están separados por $k=4=N/2^2=16/2^2$. De igual forma un par de nodos duales en el arreglo $l=3$, por ejemplo $\{x_3(4), x_3(6)\}$ es separado por $k=2=N/2^3=16/2^3$, y por último en el arreglo $l=4$, $x_4(8)$ y $x_4(9)$ están a una distancia de $k=1=N/2^4=16/2^4$.

Generalizando estos resultados se observa que el espacio entre nodos duales en un arreglo cualquiera l está dado por $N/2^l$, de modo que, considerando un nodo particular, su dual es $x_l(k + N/2^l)$, tal propiedad permite identificar fácilmente un par de nodos duales y su cálculo necesitará únicamente de una multiplicación compleja.

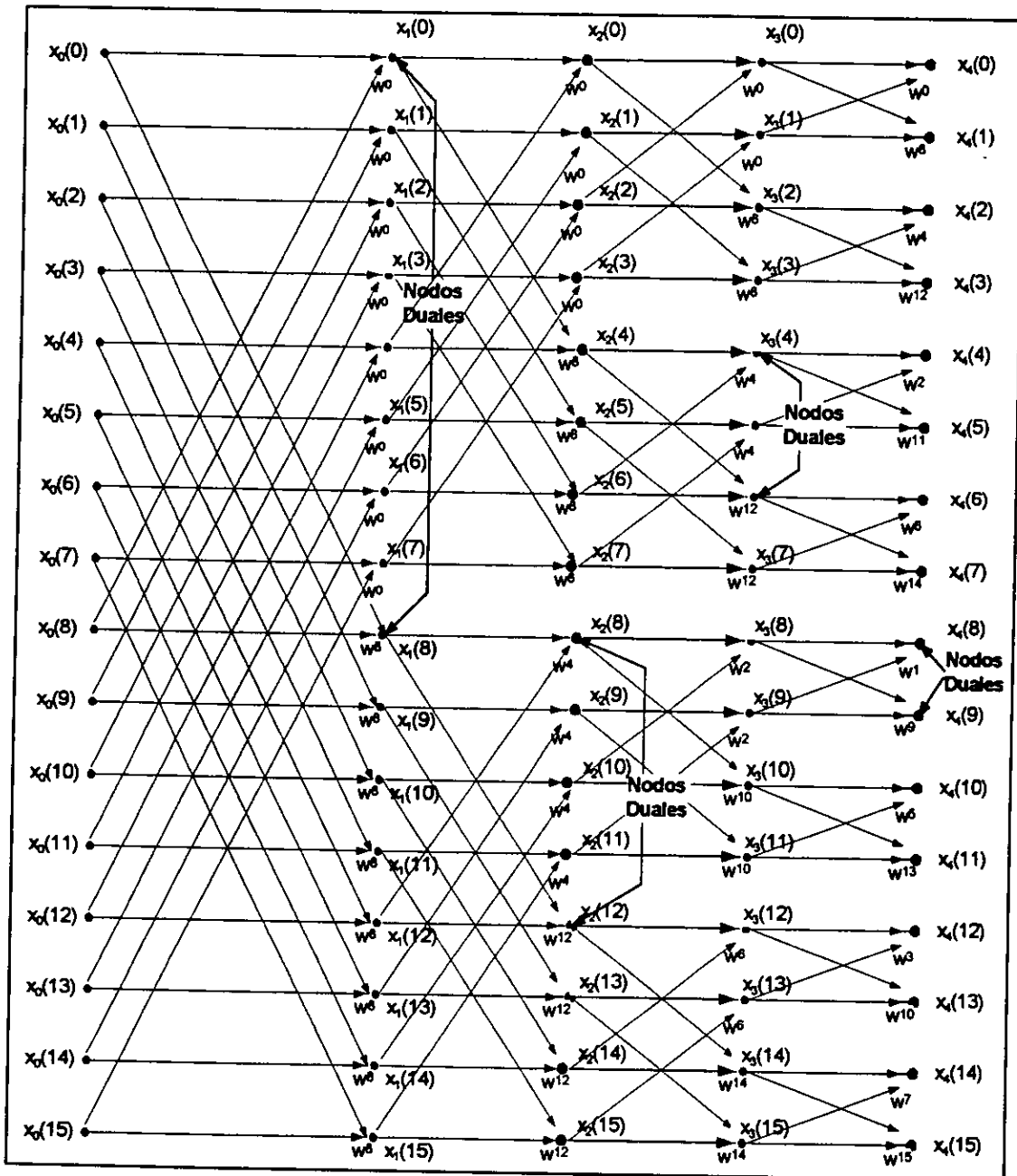


Fig. 30. Gráfica de flujo de señal de la FFT, N=16.

Para ilustrar este punto, considere $x_2(8)$ y su dual $x_2(12)$, el camino de transmisión emanado del $x_1(12)$ está multiplicado por W^4 y W^{12} antes de entrar a los $x_2(8)$ y $x_2(12)$ respectivamente. Es importante notar que $W^4 = -W^{12}$ y que sólo una multiplicación es requerida. En general, si el factor de peso de un nodo es W^P , entonces el factor de su dual es $-W^{P+N/2}$, por lo que sólo una multiplicación es necesaria para el cálculo de un par dual, y su expresión matemática es:

$$\begin{aligned} x_1(k) &= x_{l-1}(k) + w^P x_{l-1}(k + N/2^l) \\ x_1(k + N/2^l) &= x_{l-1}(k) - w^P x_{l-1}(k + N/2^l) \end{aligned} \quad (4.20)$$

Para calcular un arreglo, normalmente se empieza con el nodo $k=0$ y secuencialmente se continua hacia abajo hasta llegar al nodo dual. Para ilustrar este punto considere el arreglo $l=2$ en la figura 30, si se empieza con el nodo $k=0$, su dual estará localizado en $k = 16/2^2 = 4$, lo cual puede ser verificado por inspección. Siguiendo hacia abajo, el nodo dual está siempre localizado 4 posiciones abajo en el arreglo hasta alcanzar el 4. En este punto hay un conjunto de nodos previamente encontrados, esto es, son los duales de los 0, 1, 2 y 3. Es necesario brincar sobre los 4, 5, 6 y 7. Los 8, 9, 10 y 11 siguen la convención original de el dual localizado 4 lugares abajo en el arreglo. Resumiendo, si se opera de arriba hacia abajo en el arreglo l , entonces se calcula la ecuación 4.20 para los primeros $N/2^l$ nodos, brincando los siguientes $N/2^l$ y así sucesivamente hasta alcanzar un índice de nodo mayor que $N-1$.

Para determinar el valor de P se siguen los siguientes pasos:

- Escribir el índice k en binario con γ bits.
- Escalar o deslizar este número binario $\gamma-l$ bits a la derecha y llenar las posiciones vacías a la izquierda con ceros.
- Invertir el orden de los bits.
- El número resultante es el término P .

Para ejemplificar el procedimiento, tómese el nodo $x_3(8)$ de la figura 30. En este caso $\gamma=4$, $k=8$ y $l=3$, k expresado en binario es 1000. Si se escala $\gamma-l=4-3=1$ lugares a la derecha y se llenan con cero las lugares vacíos el resultado es 0100, si se invierten los bits se obtiene 0010 ó 2. El valor de P es por lo tanto 2. Considérese ahora un procedimiento para implementar esta operación de "inversión de bits". Se sabe que un número binario, digamos $a_4 a_3 a_2 a_1$ puede escribirse en base diez como $a_4 \cdot 2^3 + a_3 \cdot 2^2 + a_2 \cdot 2^1 + a_1 \cdot 2^0$. Si se logra describir una técnica para determinar los bits a_4, a_3, a_2, a_1 , se ha encontrado una operación para "inversión de bits". Asumiendo que M es un número binario igual a $a_4 a_3 a_2 a_1$, entonces se divide entre 2, se trunca el resultado, y a este se le multiplica por 2. Después se calcula $a_4 a_3 a_2 a_1 - 2(a_4 a_3 a_2)$. Si el bit a_1 es cero, el resultado

de la resta es cero porque la división entre 2, el truncado y la multiplicación por 2 no alteran M . Si por el contrario a_1 es uno, el truncamiento cambia el valor de M y la expresión no es igual a cero. Por esta técnica es posible determinar si el bit a_1 es cero ó uno. Se puede identificar el bit a_2 en forma similar. En este caso la expresión apropiada es $a_4a_3a_2 - 2(a_4a_3)$. Si el resultado es cero, a_2 es cero. Los bits a_3 y a_4 se determinan de la misma manera. Este procedimiento establece las bases para el desarrollo de la rutina de cómputo de "inversión de bits".

El paso final en el cálculo de la FFT es reordenar los resultados análogamente a la ecuación 4.19. Es importante recordar que el procedimiento para reordenar el vector de resultados consiste en escribir n en binario e invertirlo. Se procede de arriba a abajo en el arreglo, intercambiando $x(k)$ con la $x(i)$ apropiada, eventualmente se encontrará un nodo que ya ha sido intercambiado. Por ejemplo, en la figura 31, el nodo $k=0$ permanece en su lugar, en tanto que los nodos $k=1, 2$ y 3 son intercambiados con los nodos $8, 4$ y 12 respectivamente. El siguiente nodo a ser considerado es el 4 , pero este ya había sido intercambiado con el 2 . Para eliminar la posibilidad de considerar un nodo que ya había sido intercambiado, simplemente se verifica para ver si i (el entero obtenido para la inversión de bits de k) es menor que k . De ser así, esto quiere decir que el nodo ya había sido previamente cambiado.

Resumiendo, se sabe de la discusión previa, que el primer arreglo calculado es $l=1$ y que se comienza en el nodo $k=0$ trabajando de arriba hacia abajo en el arreglo. A cada nodo k se le calcula el par de ecuaciones 4.19, donde P es determinado por el procedimiento descrito. Se continúa hacia abajo en el arreglo hasta que se alcanza una región de nodos que deben ser brincados, así se sigue hasta calcular el arreglo entero. Finalmente se reordena el arreglo final para obtener el resultado.

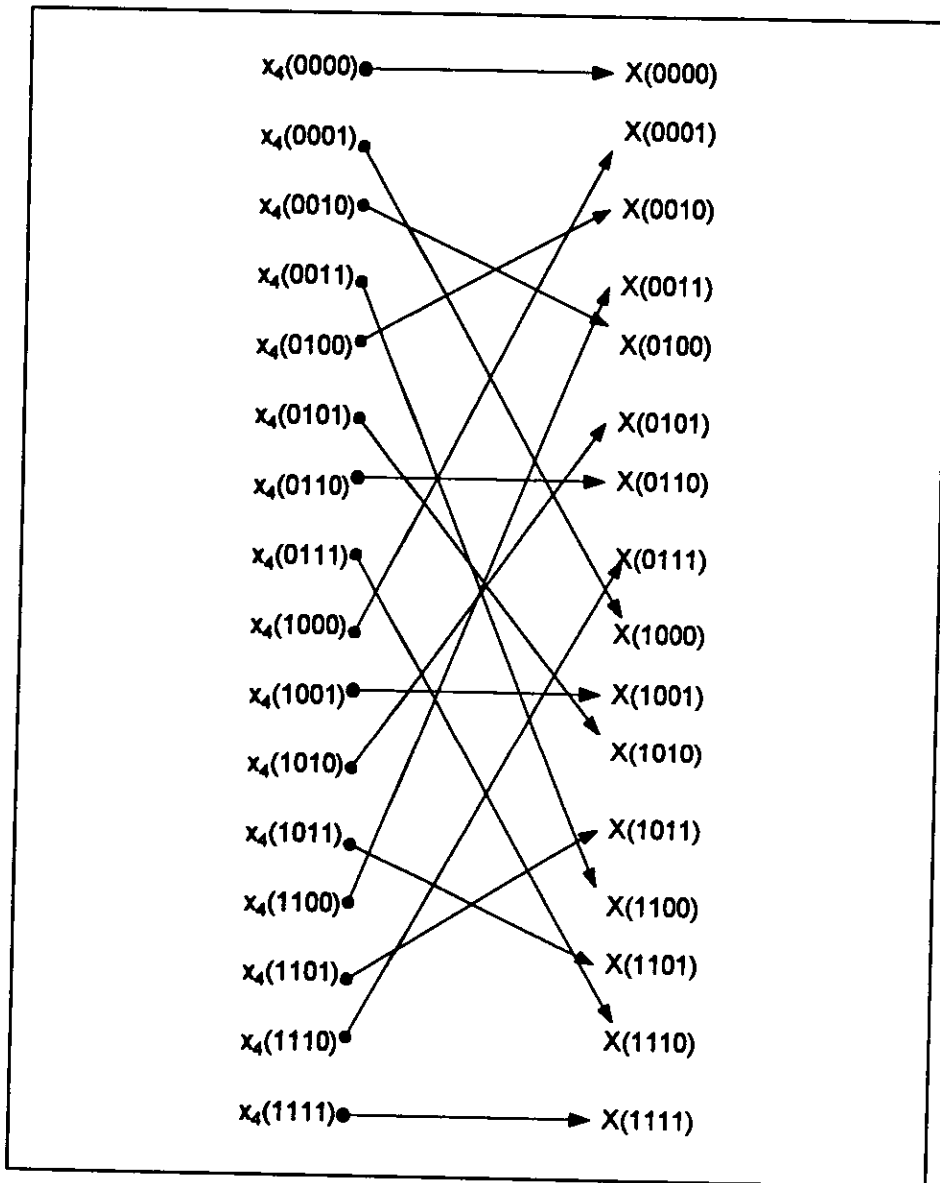


Fig. 31. Ejemplo de la operación "inversión de bits" para N=16.

El algoritmo descrito ha sido implementado en la función miembro *Realizafft* de la clase *CArchivoBinario* descrita en el capítulo anterior (tabla 13). El cálculo de la FFT se puede realizar para datos de aceleración, velocidad o desplazamiento, y es posible elegir entre dos factores de normalización denominados Sísmico $\left(FN = \frac{2}{\text{muestras}} \right)$ y Sísmológico

$(FN = \text{incremento tiempo} \times \sqrt{\text{muestras}})$. El número máximo de muestras (por canal) que maneja ProAcel para este algoritmo es de 131072 (2^{17}). Debe recordarse que el algoritmo de la FFT requiere que el número de muestras a considerar en el cálculo sea una potencia de 2, por lo que la función se encarga de agregar ceros al final de la señal hasta completar la cantidad de muestras necesaria. Por ejemplo, si la señal está compuesta de 27853 muestras, los puntos de la FFT serán 32768, esto es, la potencia de 2 mayor o igual al número de muestras original. La figura 32 muestra a grandes rasgos la secuencia de pasos de la función *Realizafft*.

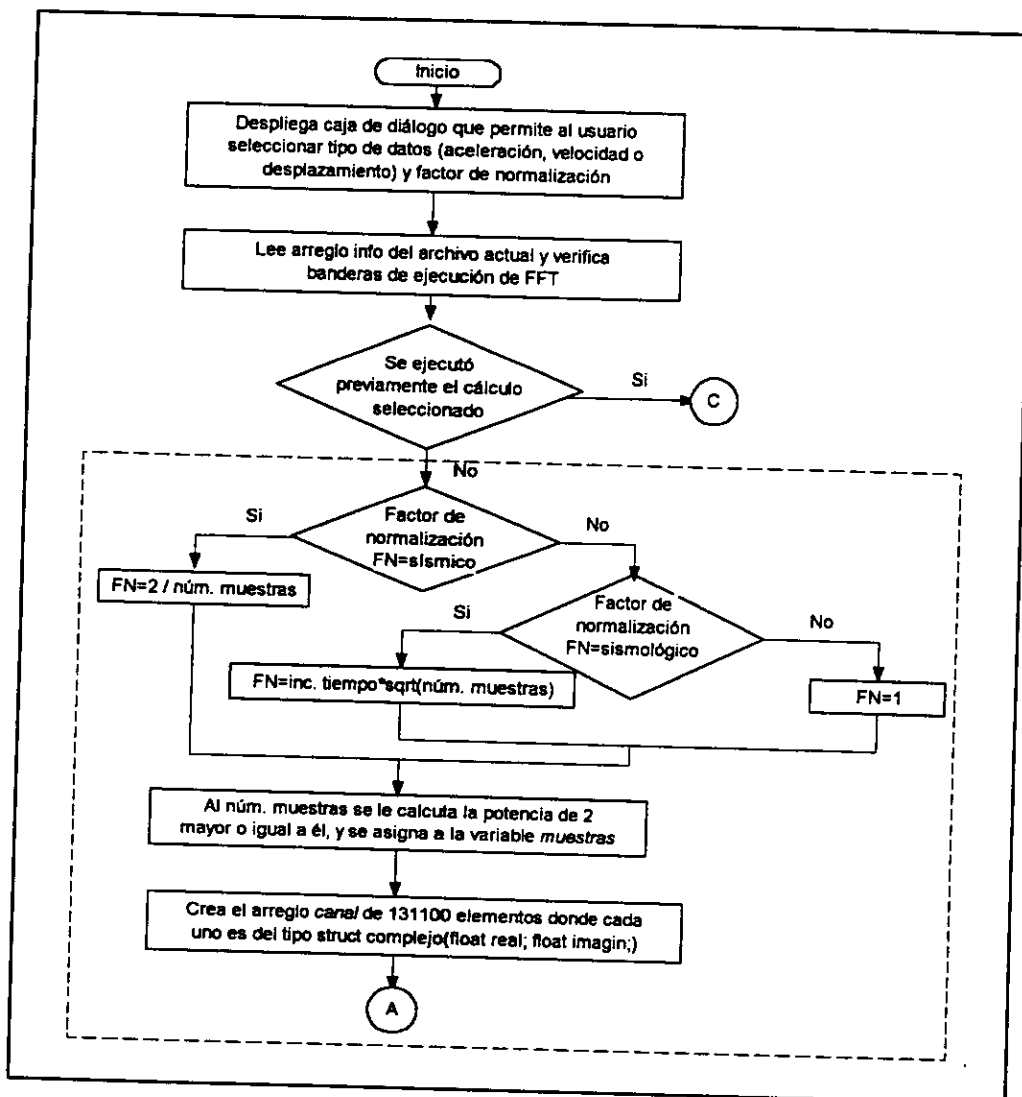


Fig. 32. Función *Realizafft*. La línea punteada indica que los pasos enmarcados se repiten para los datos correspondientes a los canales 2 y 3.

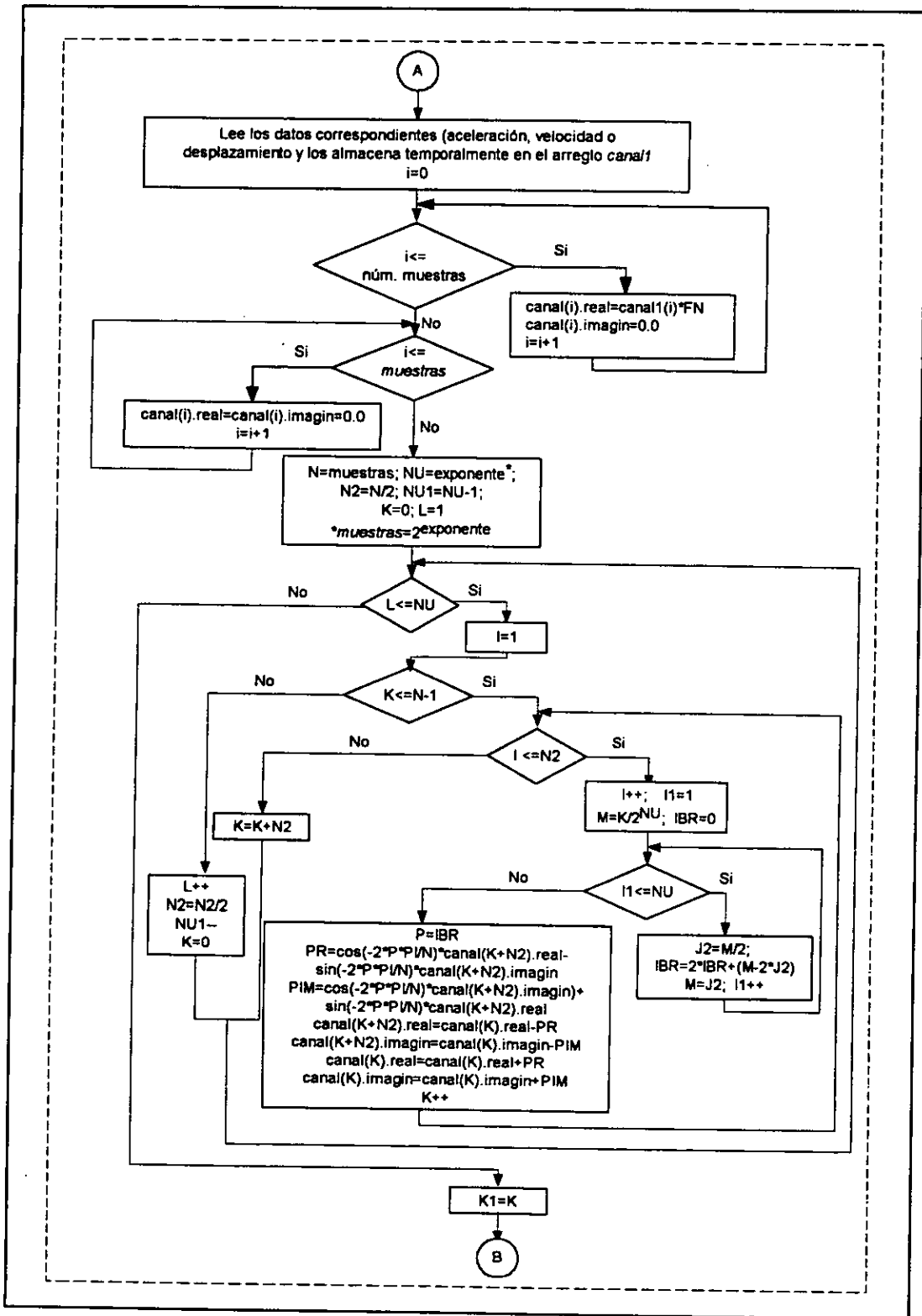


Fig. 32. (Continuación).

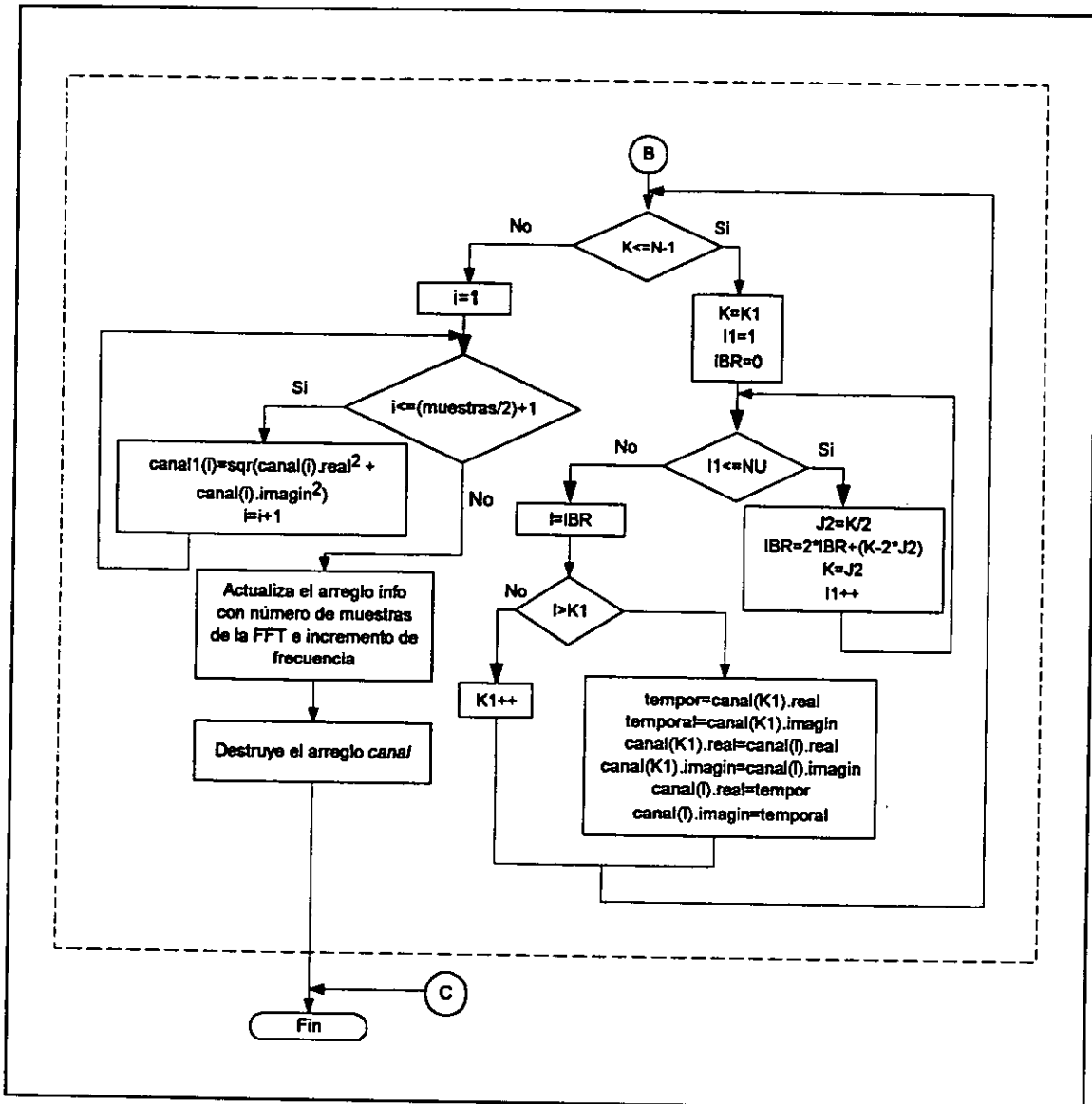


Fig. 32. (Continuación)

4.5 Filtrado del espectro de Fourier

La aplicación del algoritmo de la FFT da como resultado una gráfica como la que se muestra en la figura 33.

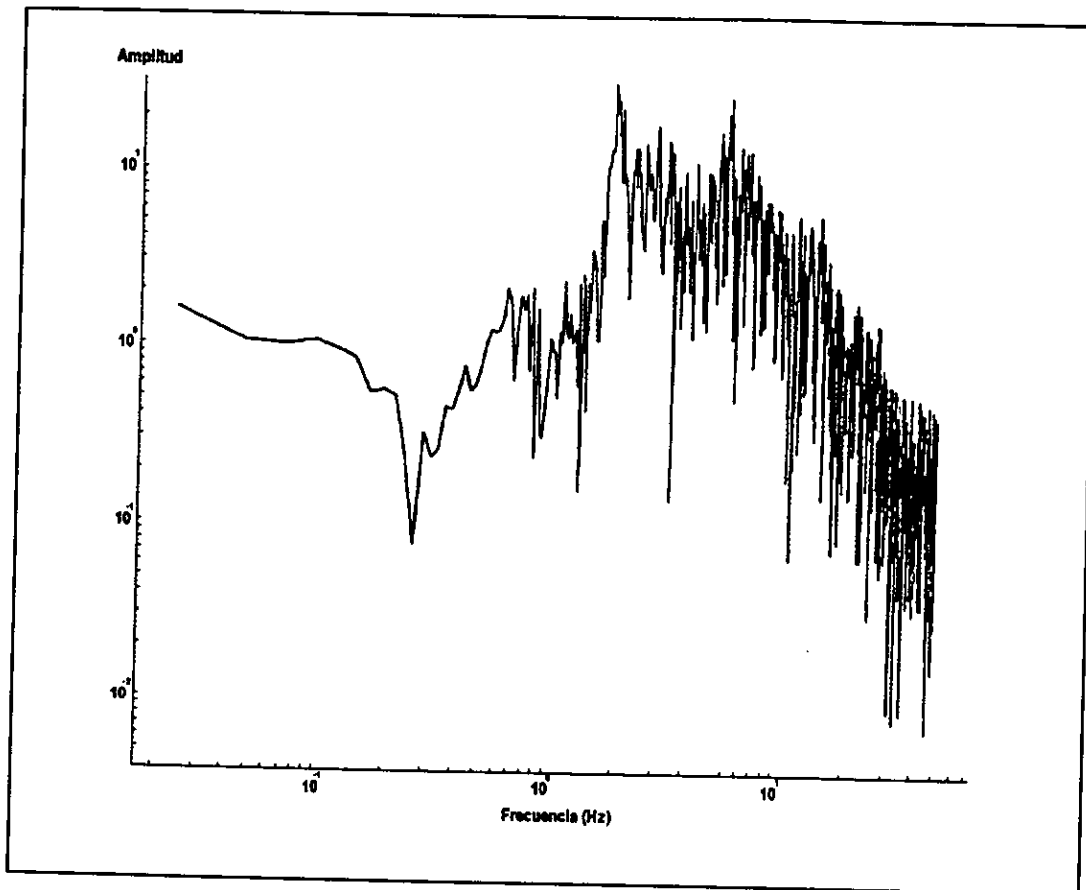


Fig. 33. Espectro de Fourier sin suavizar.

Como se observa, el trazo de los valores da como resultado una línea con un importante número de oscilaciones en torno a una tendencia general. Para eliminar este inconveniente se realiza un suavizado de la curva obteniendo una gráfica como la mostrada en la figura 34. En ella se han conservado sin alteración los puntos donde ocurren los máximos, y solo, en un porcentaje muy pequeño, se afecta la amplitud de los mismos.

El algoritmo implementado en la función *SuavizaFFT* de la clase *CArchivoBinario* ha sido ampliamente usado en el procesamiento de acelerogramas en el I de I. Básicamente consiste en la aplicación de un filtro que va promediando las amplitudes de la señal comprendidas dentro de una banda específica de frecuencias que va desplazándose a lo largo de toda la señal. La secuencia de pasos de la función se detalla en la figura 35.

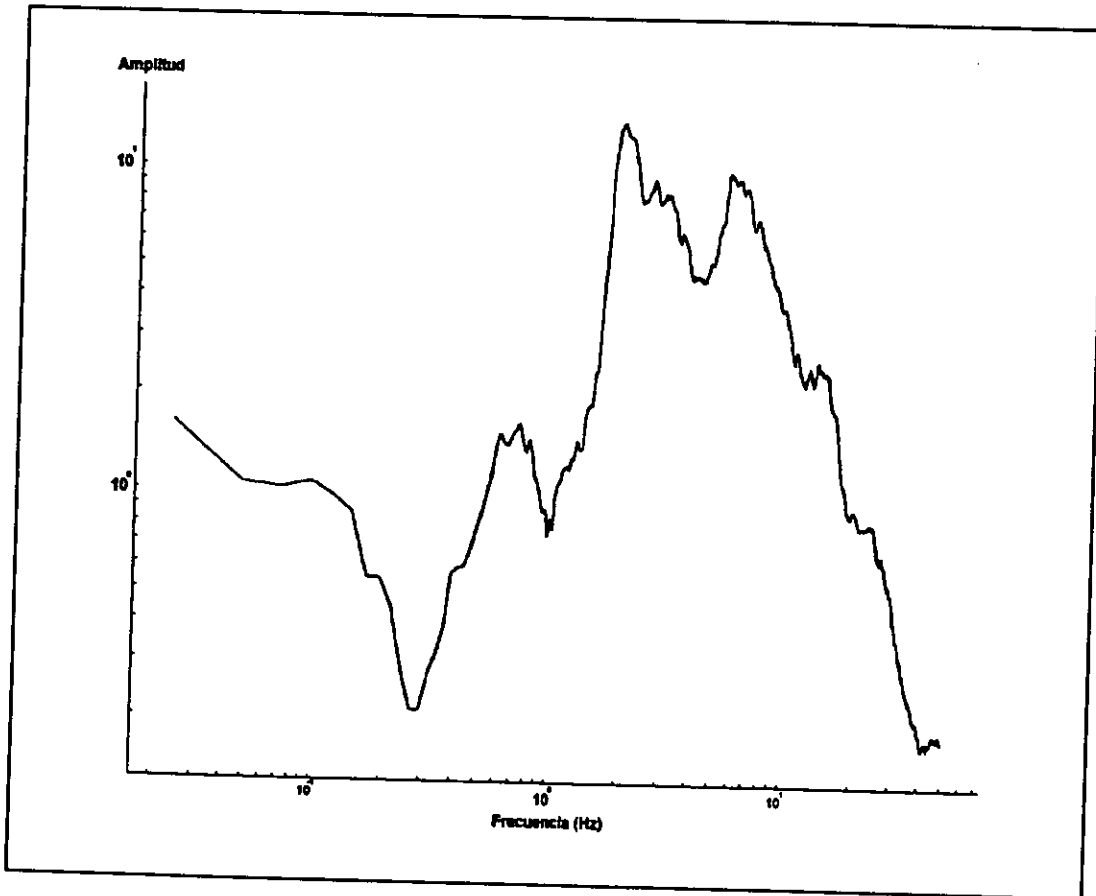


Fig. 34. Espectro de Fourier suavizado.

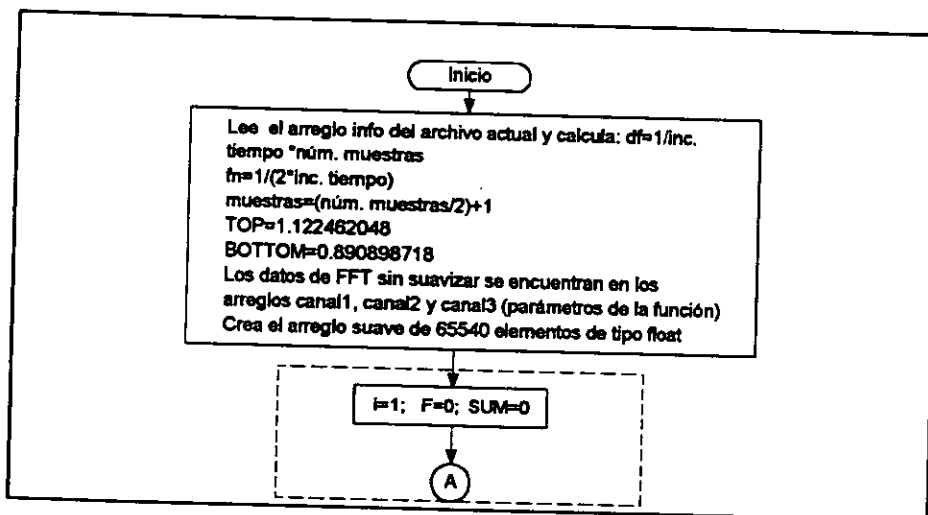


Fig. 35. Función *Suavizafft*. La línea punteada indica que los pasos enmarcados se repiten para los datos correspondientes a los canales 2 y 3.

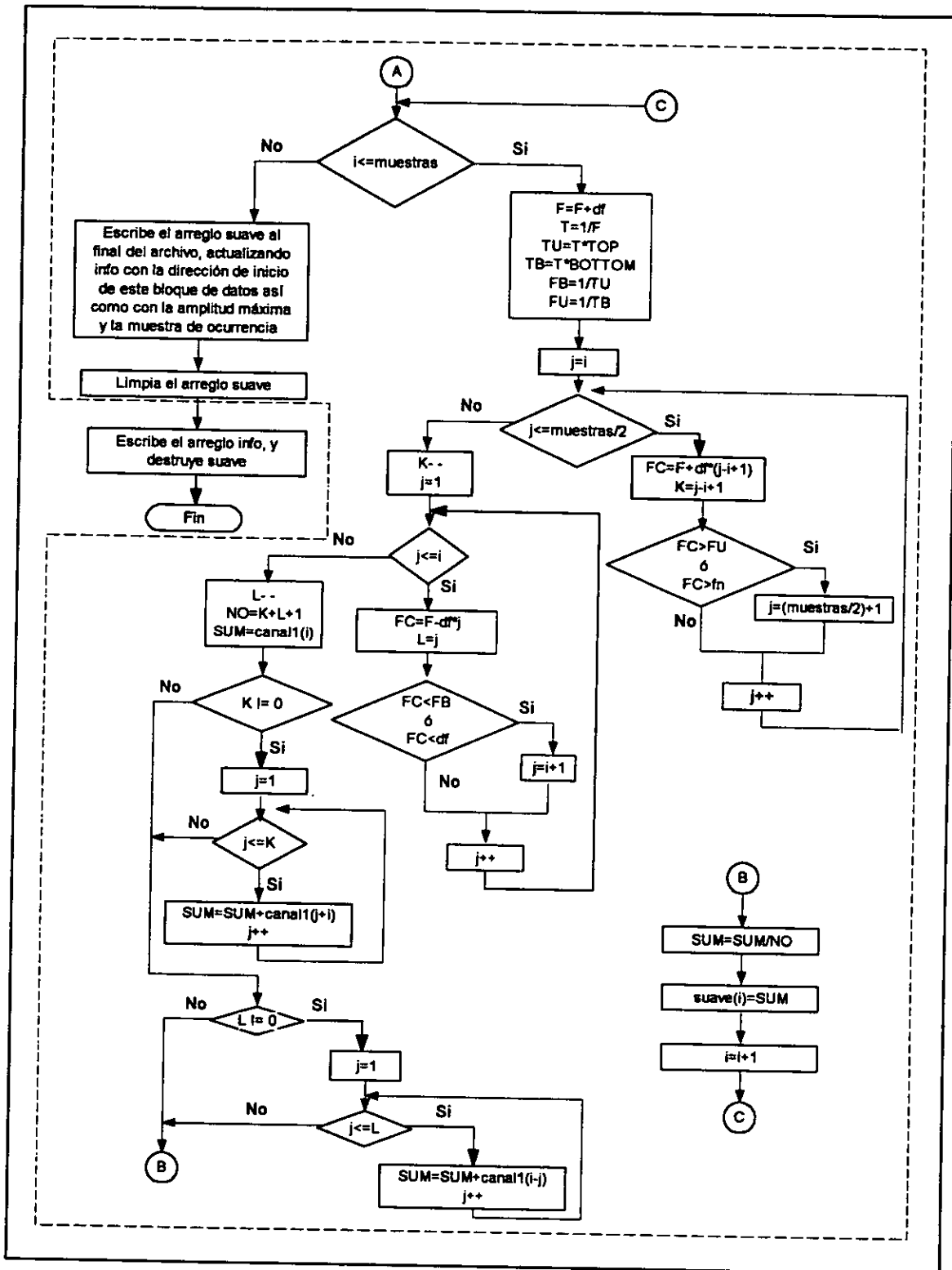


Fig. 35. (Continuación).

4.6 Graficación

De la misma forma que las gráficas lineales (aceleración, velocidad o desplazamiento) descritas en el capítulo anterior, las denominadas espectro de Fourier se integran de dos partes: encabezado y área de despliegue de datos (Fig. 36). La primera se origina al ejecutar las funciones *Dibuja_patrón_encabezado*, *Obten_datos_encabezado* y *Llena_encabezado* de la clase **CEncabezado** (tabla 9) y contiene el nombre de la institución responsable de los datos, la fecha y hora de ocurrencia del sismo, referida a la hora del meridiano de Greenwich, coordenadas del epicentro, magnitud y profundidad del hipocentro en kilómetros. La segunda está compuesta por los ejes y las trazas de los datos numéricos. Los ejes son doble logarítmicos y autoescalables, esto es, el sistema calcula los valores máximos de amplitud y frecuencia de los tres canales, y conforme a estos ajusta las escalas de los ejes (la misma para cada canal).

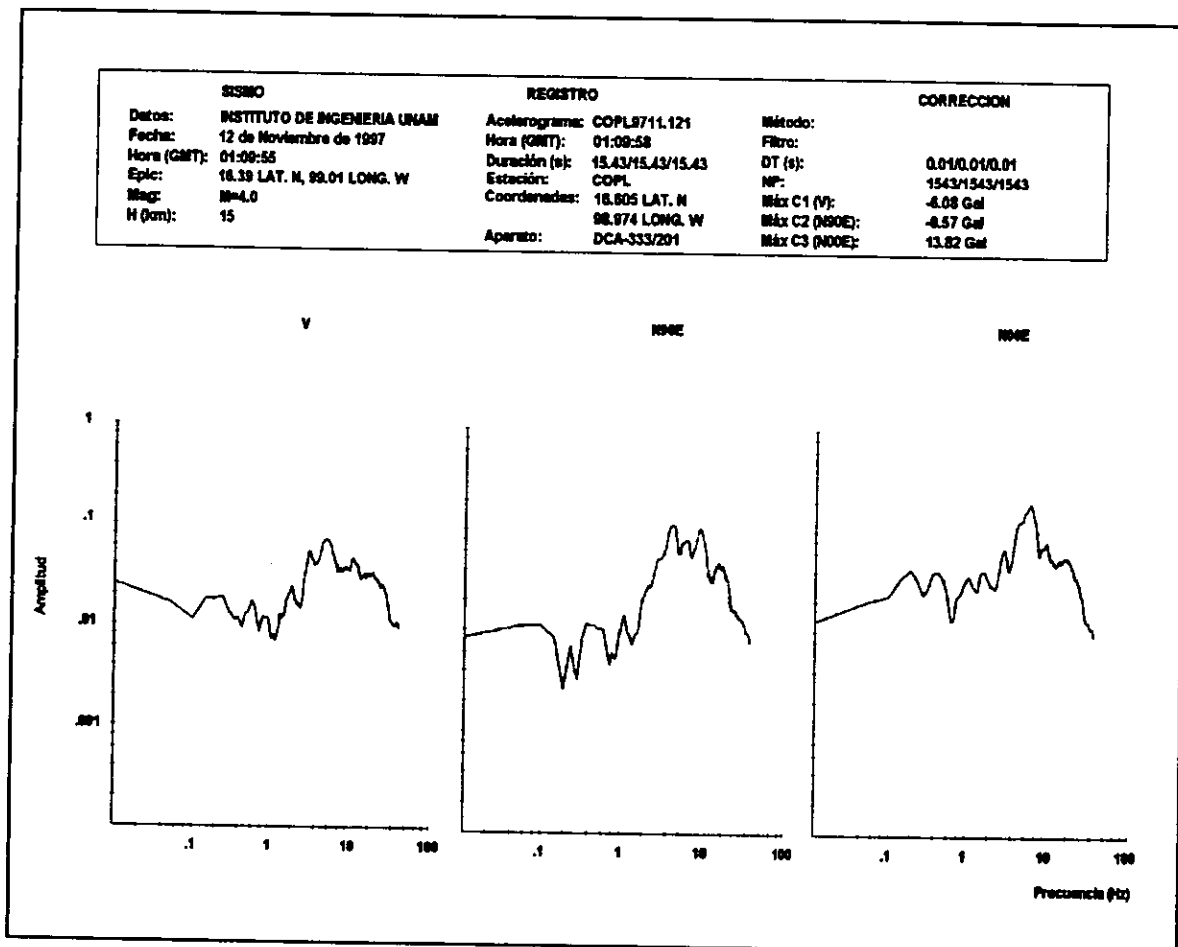


Fig. 36. Espectro de Fourier de aceleración hecho con ProAcel.

La clase *CEjes* cuenta con tres funciones miembro que se encargan de crearlos y enviarlos al dispositivo de salida adecuado, ya sea pantalla o impresora. Estas son *Dibuja_logarítmicos*, *Dibuja_log_ampl_pantalla* y *Dibuja_log_ampl_impreso* descritas previamente en la tabla 12 del capítulo 3. En cuanto a las trazas, la clase *CGráfica* (tabla 11) cuenta con las funciones *Traza_logarítmica_pantalla* y *Traza_logarítmica_impreso*, que como su nombre lo indica se encargan de graficar los datos numéricos y enviarlos a la pantalla o la impresora según se requiera. Pueden graficarse espectros de Fourier de aceleración, de velocidad o de desplazamiento a elección del usuario.

4.7 Cocientes espectrales

La razón espectral o función de transferencia es una herramienta del análisis en el dominio de la frecuencia que tiene el propósito de visualizar las frecuencias dominantes en una estructura. El cálculo numérico se puede simplificar como el cociente entre dos espectros de Fourier (Ref. 30). La clase *CArchivoBinario* contiene la función *Cociente_espectral* responsable de dicho cálculo. En primer lugar, esta función comprueba la posibilidad de ejecución, esto es, verifica que los espectros de Fourier involucrados sean de igual tipo (aceleración, velocidad o desplazamiento) y que el número de muestras e incremento en frecuencia sea el mismo para cada canal. A continuación hace una división (punto a punto) entre los espectros generando el archivo binario de resultados FTBIN 1.0 y, si el usuario lo requiere, su versión ASCII (FTASC 1.0) descritos previamente. Como se recordará del capítulo 2, la sección de encabezado de estos archivos es diferente a la del resto de los generados por ProAcel (Fig. 13), y es producida por la función *Encabezado_ftras_ascii* de *CEncabezado*.

La secuencia de pasos de la función *Cociente_espectral* se muestra en la figura 37.

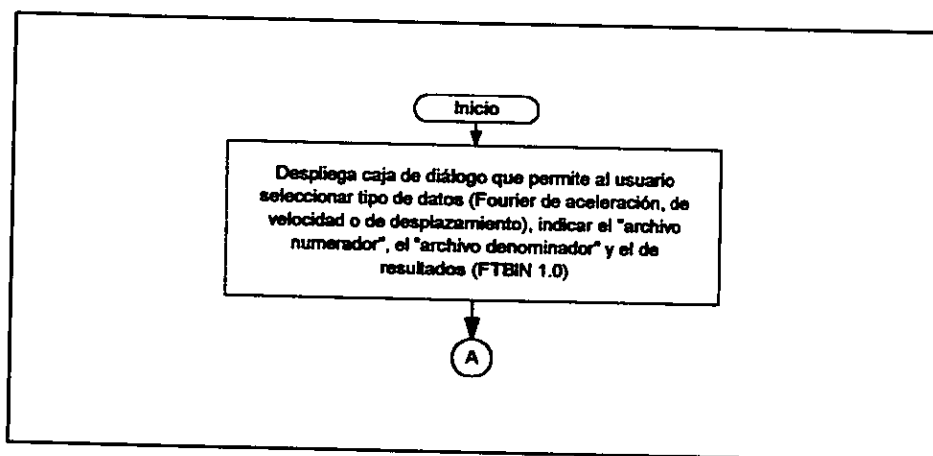


Fig. 37. Función *Cociente_Espectral*.

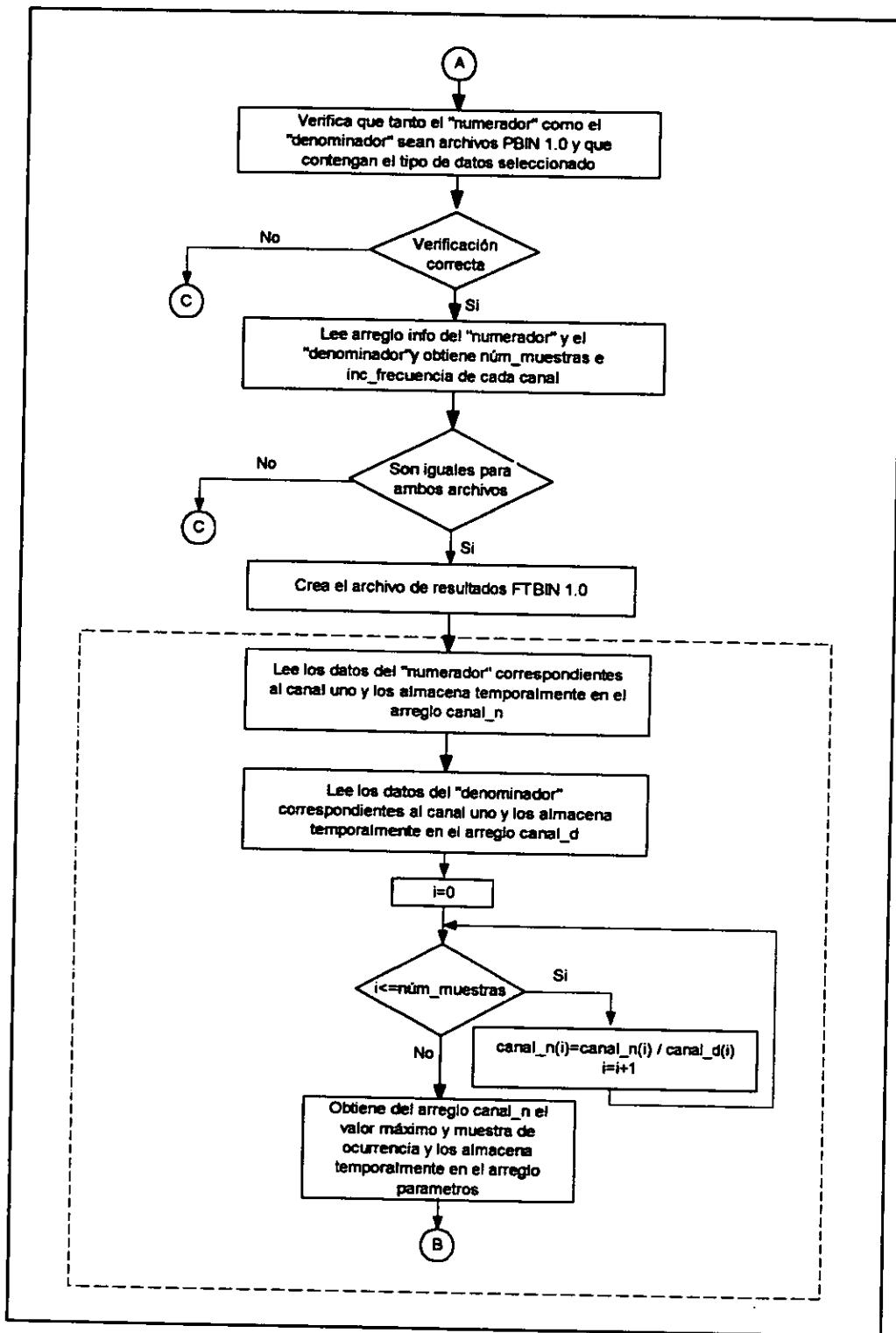


Fig. 37. (Continuación).

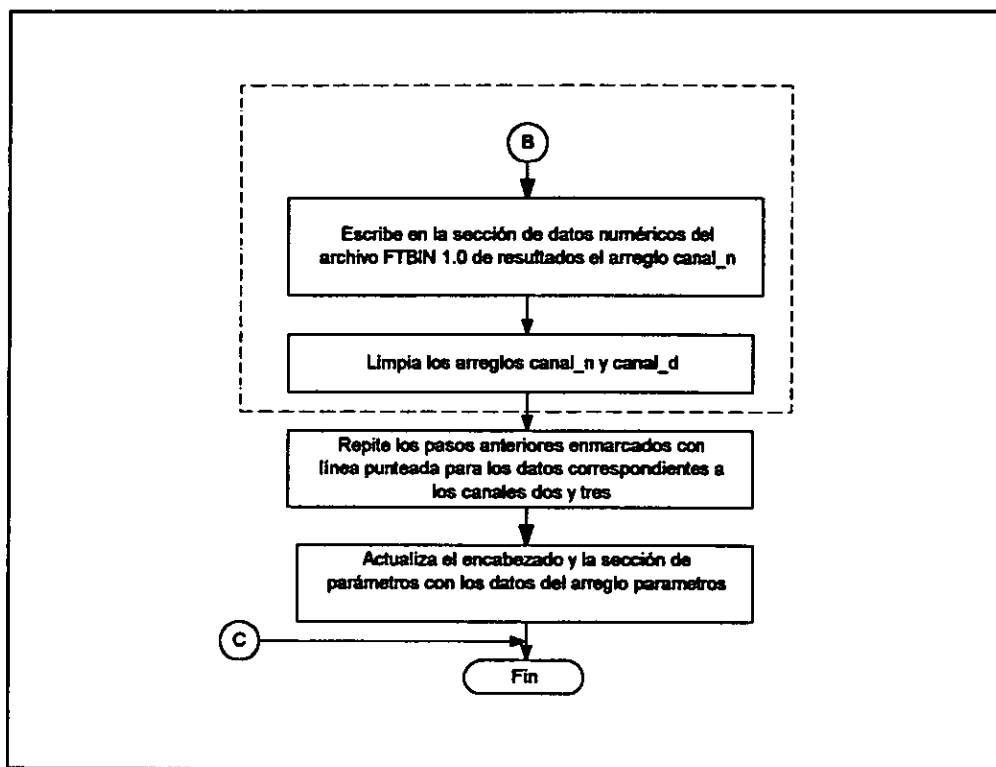


Fig. 37. (Continuación).

En cuanto a la gráfica de una función de transferencia, es similar a la del espectro de Fourier, distinguiéndose únicamente por el encabezado. La figura 38 muestra un ejemplo.

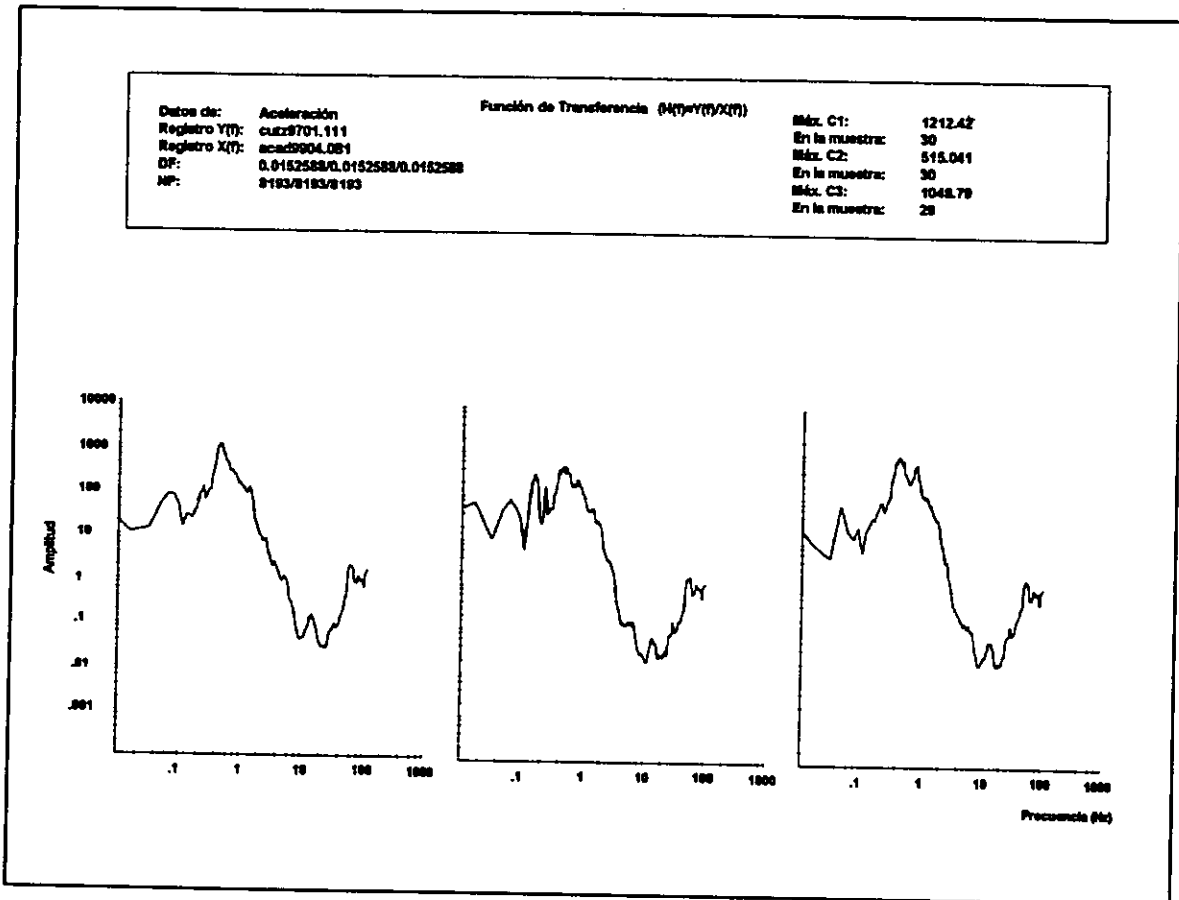


Fig. 38. Gráfica de Función de transferencia hecha con ProAcel.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Capítulo 5

Corrección de Acelerogramas

5. CORRECCIÓN DE ACELEROGRAMAS

5.1 Método de CALTECH

La historia de aceleraciones en función del tiempo de los sismos se obtiene de los acelerogramas, estos son usados por ingenieros sísmicos para el diseño de estructuras resistentes a temblores, y por sismólogos con el propósito de entender las propiedades básicas del mecanismo que da origen a un temblor. Puesto que la aceleración registrada representa la fuente principal de medición experimental, es de suma importancia "reparar" al máximo la información contenida en estos registros, la cual puede contener señales indeseables que interfieren con la información propia del sismo y a la que denominaremos ruido. Existen principalmente dos tipos de este: el ambiental, producido por el paso de vehículos, ganado, tormentas, etc.; y el ruido instrumental, debido a que el aparato posee masa, amortiguamiento y rigidez propias que inducen velocidades y desplazamientos en el equipo mismo.

El Instituto Tecnológico de California (CALTECH) desarrolló en los años 60 un método de corrección de acelerogramas conocido a nivel mundial como el Método de CALTECH para corrección de acelerogramas, el cual fue adoptado por un gran número de instituciones dedicadas al estudio de temblores. El método de CALTECH engloba corrección instrumental y de línea base¹⁰. La primera se basa en la ecuación diferencial de movimiento que describe el comportamiento de un sistema amortiguado de un grado de libertad:

$$\ddot{x} + 2\omega_0\zeta_0\dot{x} + \omega_0^2x = -a \quad (5.1)$$

donde:

- x = desplazamiento relativo de la masa del transductor
- ω_0 = frecuencia natural del transductor ($\omega_0 = 2\pi f_0$)
- ζ_0 = fracción del amortiguamiento crítico
- a = aceleración de la tierra

y consiste básicamente en interpolar el acelerograma a un incremento de tiempo constante, extenderlo de acuerdo a $\ddot{x}(-t) = \ddot{x}(t)$ y $\ddot{x}(T+t) = \ddot{x}(T-t)$, realizar un filtrado paso-bajas, integrar la función resultante para obtener \dot{x} y x , y finalmente sustituirlas en la ecuación 5.1 para calcular la aceleración del terreno (Ref. 31).

¹⁰ La corrección de línea base consiste en ajustar a los datos una línea de referencia o de aceleraciones nulas.

La figura 39 resume el procedimiento a seguir:

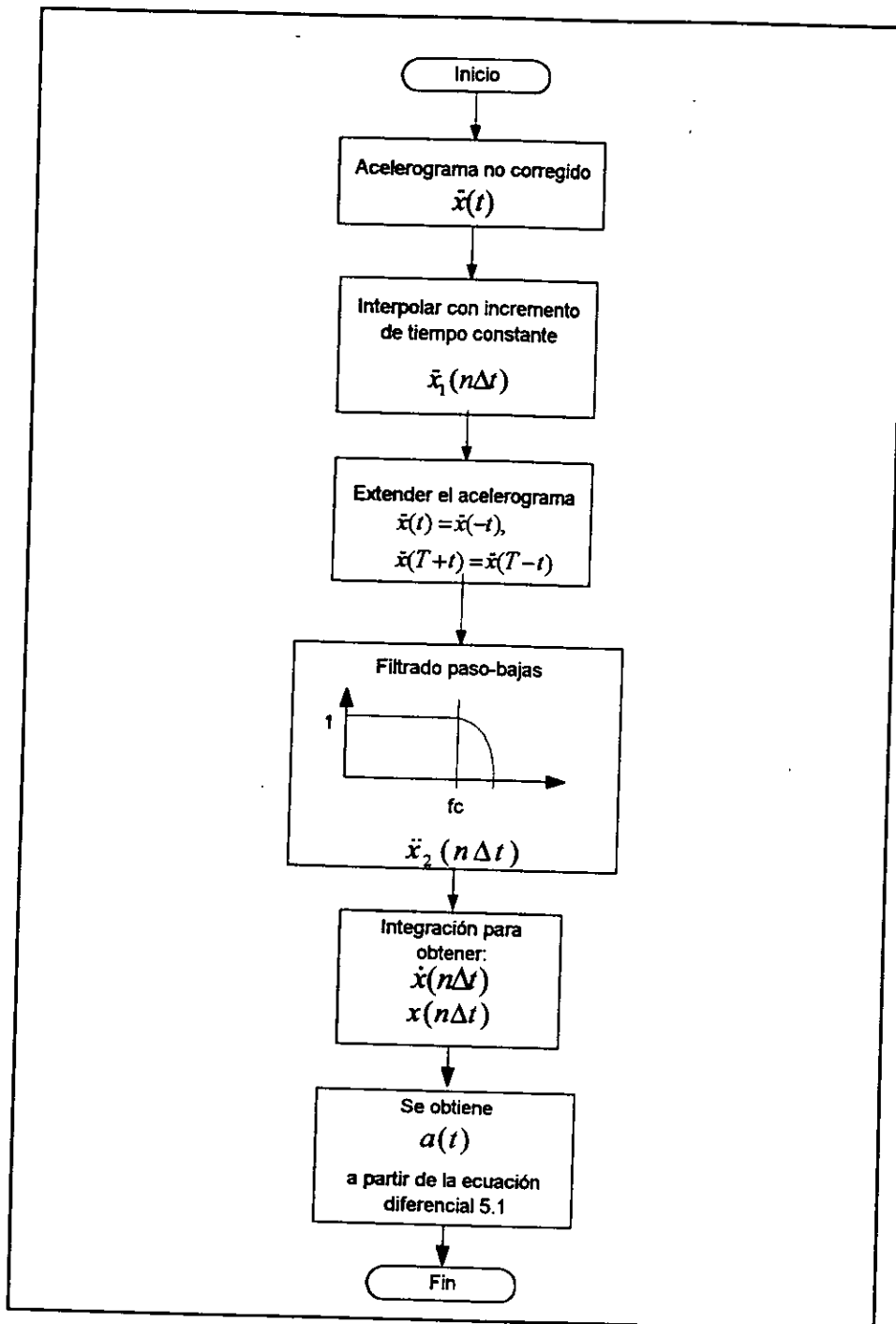


Fig. 39. Corrección instrumental.

Los pasos correspondientes a la corrección de línea base del método de CALTECH se muestran a continuación:

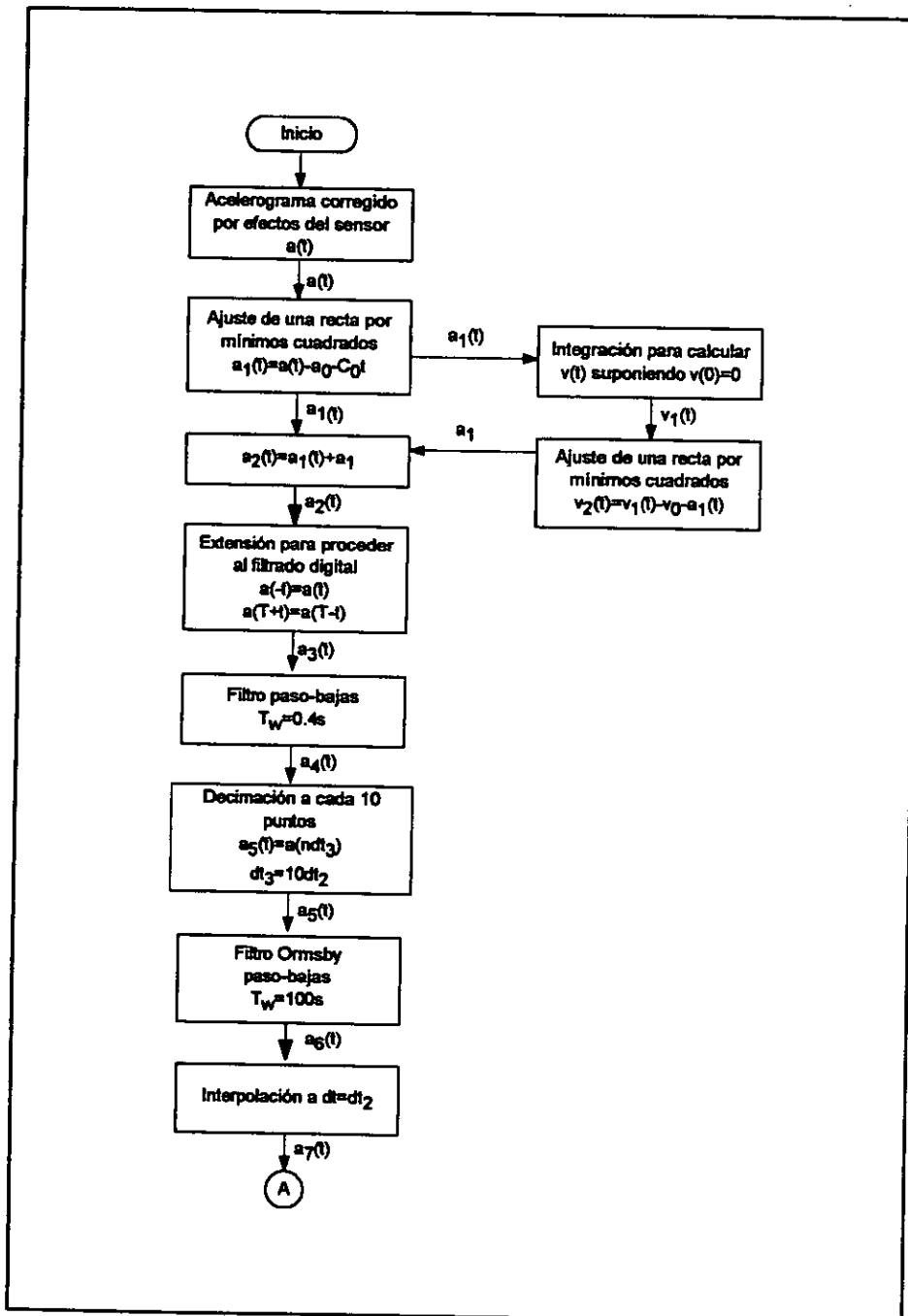


Fig. 40. Corrección de línea base.

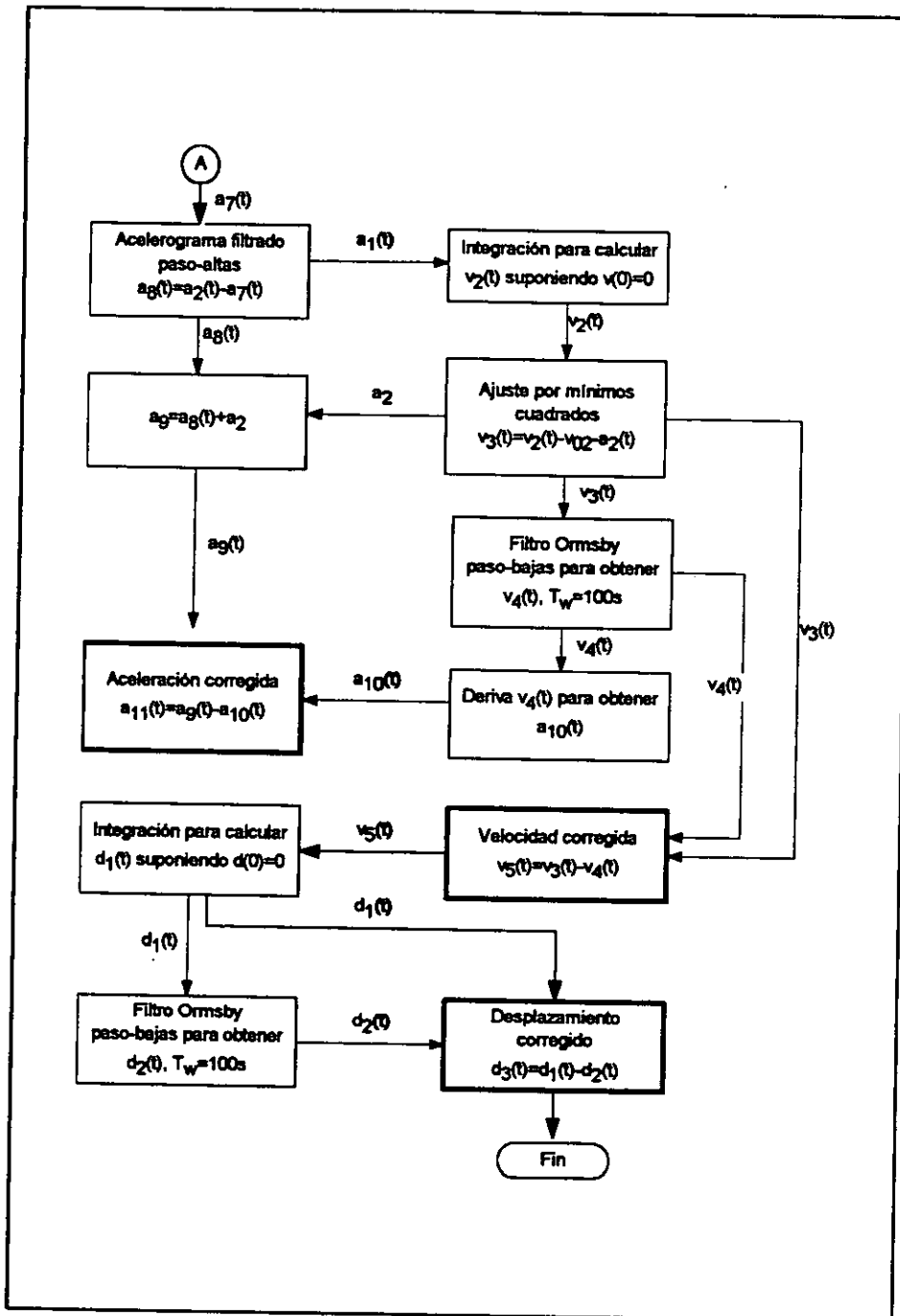


Fig. 40. (Continuación).

5.2 Cálculo de velocidades y desplazamientos

Hoy en día los acelerógrafos empleados son instrumentos de amplia escala dinámica, con mayor resolución y amplia respuesta en frecuencia, además de incluir nuevas tecnologías de registro y almacenamiento de datos. Lo anterior, aunado a la calibración y mantenimiento periódico de los aparatos da como resultado que los registros de aceleración producidos sean de mayor calidad y confiabilidad haciendo innecesaria una corrección tan rigurosa como la descrita en la sección anterior. En su lugar se realiza únicamente la de línea base que consiste en ajustar el acelerograma a una referencia en donde, teóricamente, para cualquier tiempo el valor de aceleración es nulo (Ref. 32). Esta corrección ha sido implementada en la función miembro *Restar_media* de la clase *CArchivoBinario* descrita en el capítulo 2 (tabla 13). Básicamente consiste en obtener el valor medio de los datos de aceleración para cada canal de acuerdo a:

$$S = \frac{\sum \bar{x}_i}{N_p} = \frac{\sum A(i)}{N_p} \quad (5.2)$$

donde:

S: valor medio de aceleración del número total de muestras
 A(i): vector de aceleraciones
 \bar{x}_i : valor de aceleración en el instante i
 Np: número de puntos del acelerograma

Una vez que se ha obtenido S, se resta a cada muestra del vector de aceleraciones:

$$A(i)_c = \bar{x}_i - S$$

donde:

A(i)_c: vector de aceleración corregido

Con los datos de aceleración ya corregidos, se pueden obtener los de velocidad y desplazamiento por medio de un proceso de integración que emplea el algoritmo siguiente (Ref. 33):

$$V_i = \frac{dt}{12}(5 * A_{i-1} + 8 * A_i - A_{i+1}) + V_{i-1}$$

$$V_{i+1} = \frac{dt}{3}(A_{i-1} + 4 * A_i + A_{i+1}) + V_{i-1}$$

$$D_i = \frac{dt}{24}(7 * A_{i-1} + 6 * A_i - A_{i+1}) + dt * V_{i-1} + D_{i-1}$$

$$D_{i+1} = \frac{dt^2}{3}(2 * A_{i-1} + 4 * A_i) + 2 * dt * V_{i-1} + D_{i-1}$$

para $i=2,4,6,8,\dots,N_p$. $V_1 = V_0$ y $D_1 = D_0$

La función miembro *Integrar* de la clase **CArchivoBinario** corresponde a la implementación del algoritmo. Una descripción más detallada se presenta en el diagrama de la figura 41:

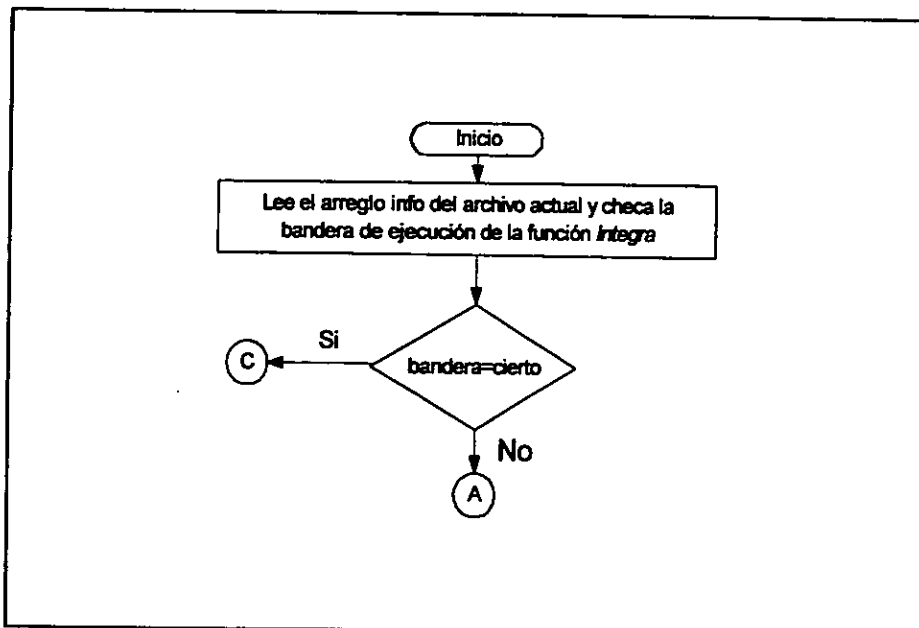


Fig. 41. Función *Integra*.

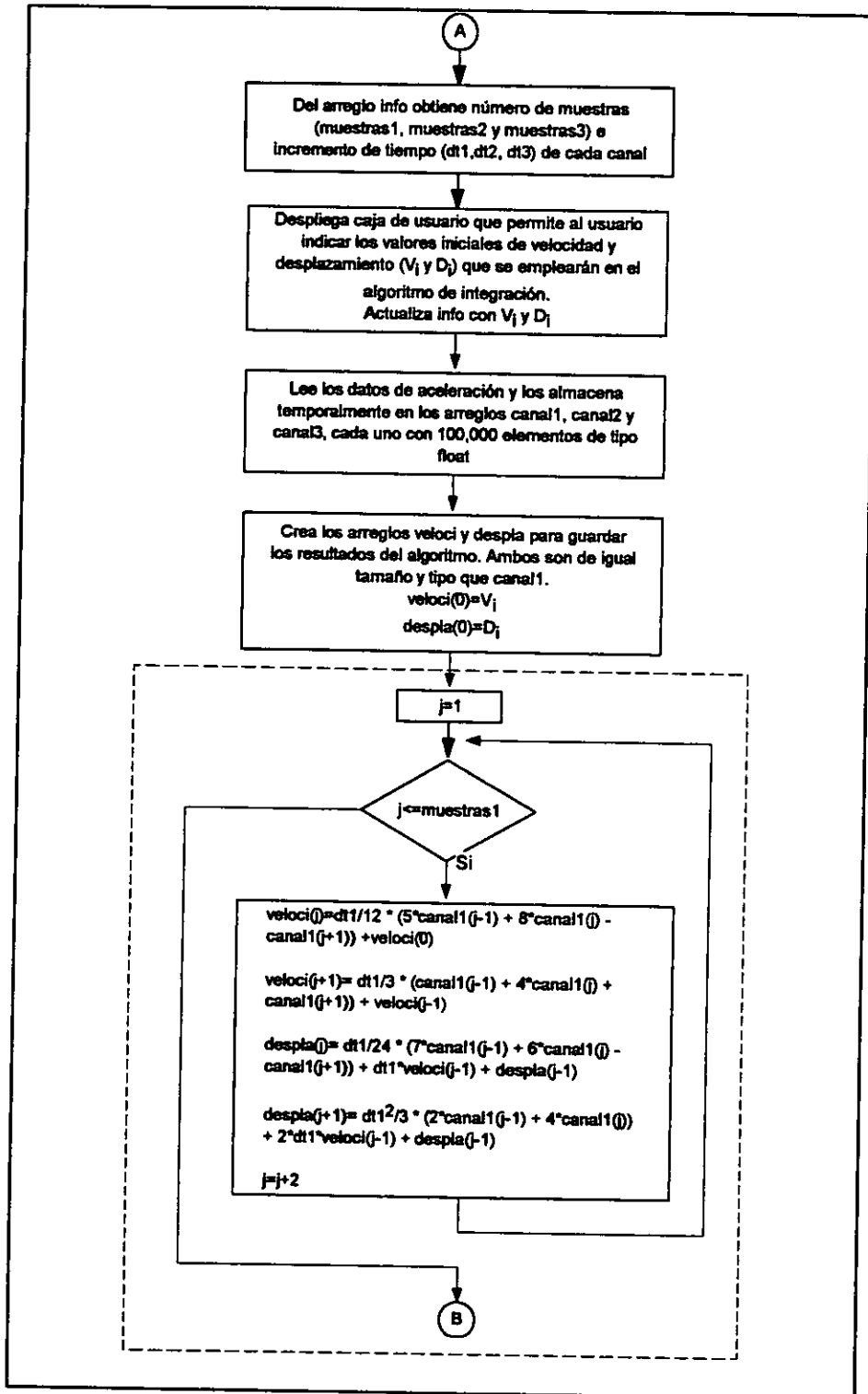


Fig. 41. (Continuación).

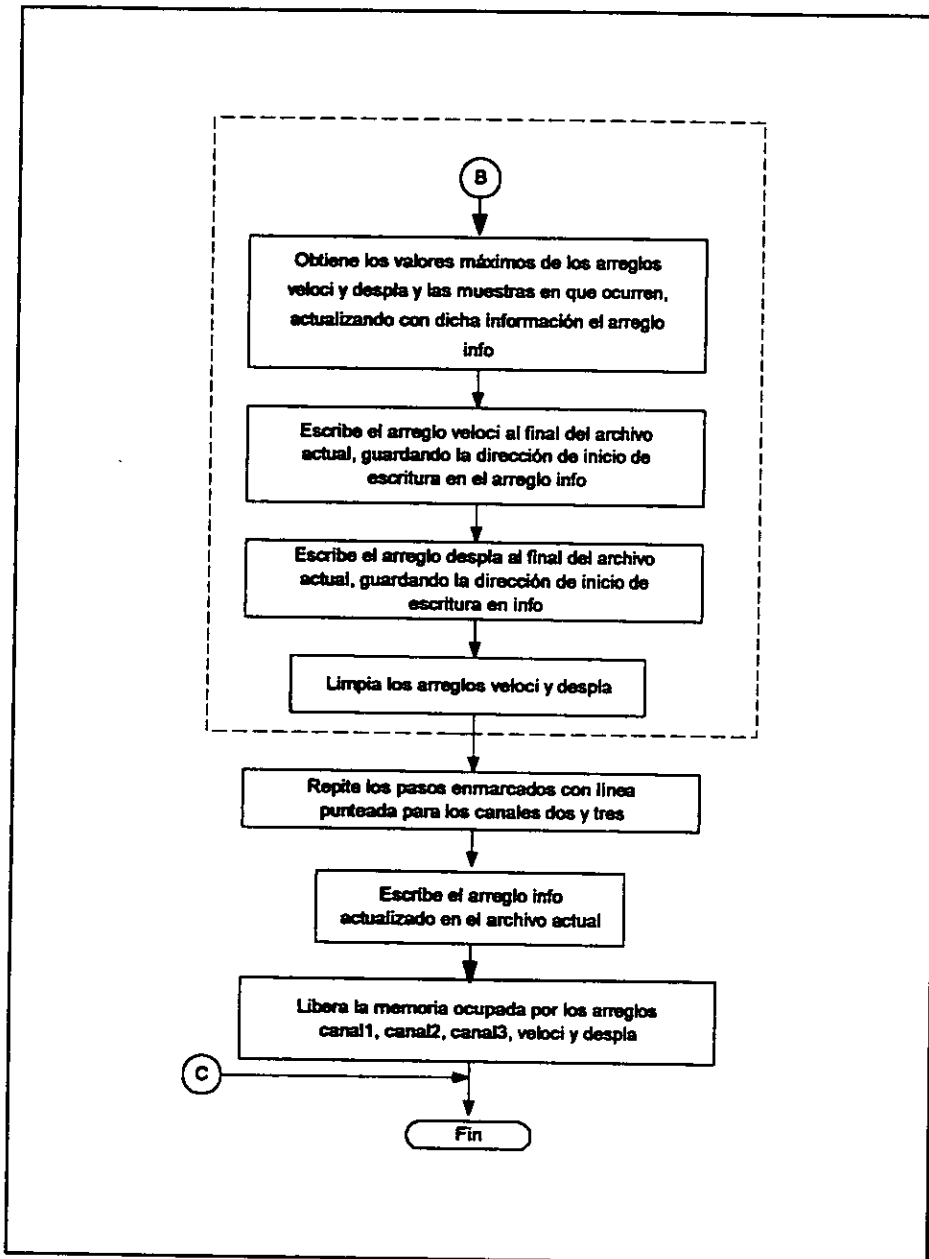


Fig. 41. (Continuación).

5.3 Espectro de respuesta

En el cálculo de las estructuras se observa que uno de los agentes externos capaces de llevarlas a una condición de estado límite es el sismo. Los efectos que causa dependen de tres factores : 1) las características de la estructura en cuestión, 2) las características de las ondas producidas por el temblor y, 3) la naturaleza del suelo en el lugar. Un sismo puede ser visto como una excitación en la base de las estructuras, las que se comportan como sistemas vibratorios que pueden ser tratados como un sistema de un grado de libertad. La excitación, en este caso el temblor se mide con el desplazamiento, la velocidad y la aceleración que sufre el suelo en diferentes direcciones (Ref. 34). En 1932 M. Biot aportó a la Ingeniería Sísmica una de las herramientas más valiosas de las que hace uso el diseño sísmico de estructuras, esta técnica se denomina *espectro de respuesta*. El espectro de respuesta de un sismo es una gráfica de las respuestas máximas absolutas inducidas por el movimiento sísmico en estructuras de comportamiento lineal y de un grado de libertad, con diferentes períodos naturales de vibración pero igual amortiguamiento. En general, para entender el efecto de un acelerograma (sismo) en diferentes estructuras se mantiene fija la fracción del amortiguamiento crítico¹¹ y se calcula alguna respuesta máxima, usualmente la aceleración, para distintos valores de T; los resultados se grafican con T como abscisa y se obtiene así el espectro de respuesta del temblor (Fig. 42).

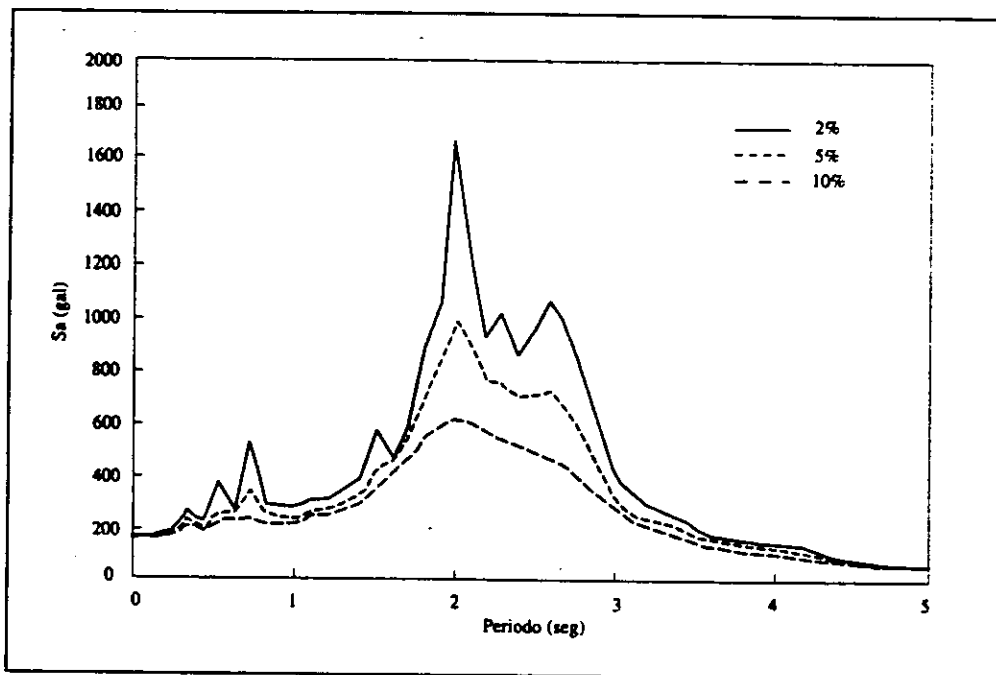


Fig. 42. Espectro de respuesta

¹¹ Se conoce como amortiguamiento crítico el que tiene una estructura cuando, al separarla de su posición y soltarla no oscila sino que regresa de su posición de equilibrio.

El espectro de respuesta constituye una de las herramientas más valiosas en Ingeniería Sísmica, hoy en día se emplea -entre otras aplicaciones- en el diseño preliminar de estructuras resistentes a temblores, en estudios de amplificación de ondas de la tierra, y en la obtención de espectros de diseño. Su cálculo, como se mencionó, involucra un sistema de un grado de libertad como el mostrado en la figura 43, donde $x=x(t)$ representa el desplazamiento relativo entre la estructura y su base, m la masa, c las propiedades de amortiguamiento del sistema y k la rigidez del mismo.

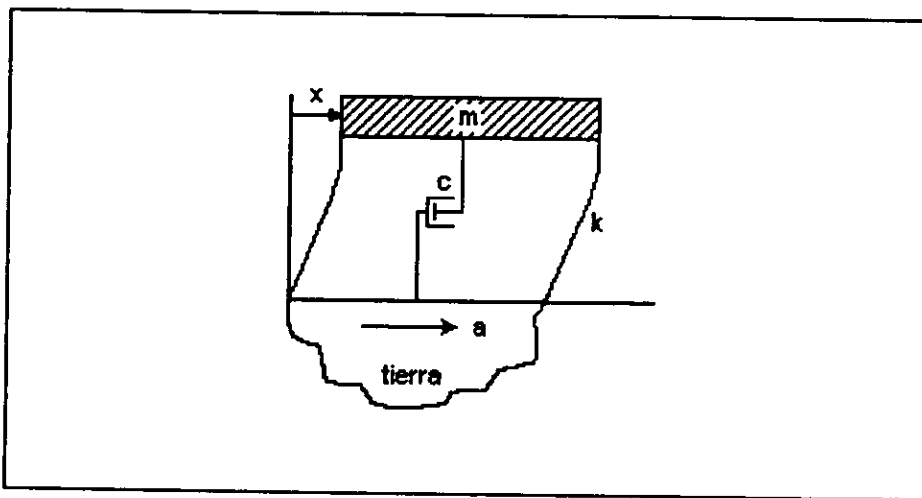


Fig. 43. Sistema de un grado de libertad.

La ecuación diferencial de movimiento para la aceleración de la base de esta estructura, puede ser escrita como:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -ma \quad (5.3)$$

El término no homogéneo $-ma$ representa la fuerza de inercia aplicada al sistema. Introduciendo la frecuencia natural ω_0 y el amortiguamiento crítico ζ como:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (5.4)$$

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_0} \quad (5.5)$$

La ecuación (5.3) puede ser ahora escrita como:

$$\ddot{x} + 2\omega_0 \zeta \dot{x} + \omega_0^2 x = -a \quad (5.6)$$

Para cualquier aceleración general de la base $a(t)$, el desplazamiento relativo $x(t)$ está dado por la integral de Duhamel, asumiendo las condiciones iniciales cero:

$$x(t) = \frac{-1}{\omega_0 \sqrt{1-\zeta^2}} \int_0^t a(\tau) e^{-\zeta \omega_0 (t-\tau)} \sin \omega_0 \sqrt{1-\zeta^2} (t-\tau) d\tau \quad (5.7)$$

La obtención del espectro de respuesta se inicia resolviendo numéricamente la ecuación 5.7 para un valor de ζ definido como fracción del crítico, un período $\tau = \frac{2\pi}{\omega_0}$, y con cada valor de aceleración del acelerograma correspondiente. A continuación se encuentra el valor máximo y se procede con el siguiente valor de τ hasta completar los valores de los períodos deseados. En seguida se selecciona un nuevo valor de ζ y se repite el proceso.

Los espectros de respuesta se relacionan entre sí de manera simple, basta con calcular uno de ellos para poder obtener los otros dos, de allí el empleo de términos como seudovelocidad y pseudoaceleración. De lo anterior se desprenden dos ecuaciones que expresan la equivalencia entre pseudoaceleración y seudovelocidad (Ref. 35):

$$S_a = -\omega^2 * S_d \quad (5.8)$$

$$S_v = \omega * S_d = \frac{S_a}{\omega} \quad (5.9)$$

donde:

S_a = Pseudoaceleración
 S_v = Seudovelocidad
 S_d = Seudodesplazamiento

Capítulo 6

Conclusiones

6. CONCLUSIONES

- México se encuentra localizado en una zona geográfica que tiene un potencial sísmico importante, razón por la cual el estudio del fenómeno sísmico y sus efectos en seres humanos y estructuras es de primordial interés.
- En la actualidad nuestro país cuenta con una importante red acelerográfica para el registro de temblores de gran intensidad, dicha red ha producido una gran cantidad de información que tiende a incrementarse de manera importante, lo que ha traído como consecuencia la necesidad de desarrollar mejores sistemas para el procesamiento de la información.
- El grupo de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes ha integrado y catalogado la información que, sobre registros de sismos intensos, se ha generado en el país en los últimos 40 años; además, ha creado estándares para el manejo y difusión de la información.
- Si bien, en el mercado existe una gran variedad de paquetes y programas de cómputo para el proceso de las señales sísmicas, en lo general, no responden a las necesidades particulares de trabajo de los distintos grupos dedicados al análisis, catalogación y almacenamiento de la información.
- El sistema para el procesamiento de acelerogramas ProAcel, responde a la necesidad de contar con un sistema de filosofía propia, acorde a las necesidades nacionales y totalmente compatible a los estándares del grupo de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes. Con ProAcel se puede realizar el procesamiento de registros sísmicos en forma sistemática, rápida y sencilla, brindando al usuario los resultados en forma clara y concisa; permitiendo con ello realizar un análisis preliminar de los datos generados por un temblor.
- El diseño e implementación de ProAcel se realizó utilizando técnicas orientadas a objetos y herramientas de programación visual, haciendo posible que su modificación y crecimiento sean factibles y con efectos colaterales prácticamente nulos.
- El sistema se desarrolló para una plataforma de PC bajo ambiente Windows. La elección obedeció por una parte a la simple razón de que hoy en día casi todo el mundo tiene acceso a una computadora personal, y por otra, a la popularidad y facilidad de uso del ambiente Windows. Aunque las aplicaciones de 32 bits estén en plena actualidad y constante evolución, las de 16 bits no han desaparecido, ProAcel pertenece a esta última categoría, permitiendo que sea ejecutado en versiones de Windows de 16 y 32 bits.

- Parte fundamental de ProAcel es el diseño del denominado Archivo Binario Procesado del que se deriva el Archivo ASCII Procesado de salida. El primero está integrado por las secciones de Encabezado, Arreglo info y Datos numéricos, y contiene en su primer sección una copia de la información general del acelerograma igual a la presentada en el encabezado del archivo ASA 2.0 de entrada. En el segundo segmento se almacenan los datos más importantes del acelerograma como son el número de muestras de cada canal, el incremento de tiempo, etc., y los valores obtenidos del proceso que se haya realizado. Por último, se tienen los diferentes bloques de datos numéricos, de los que se originan los correspondientes Archivos ASCII Procesado. Este sigue las bases planteadas por el Archivo ASA 2.0, logrando así una total compatibilidad con el estándar del grupo de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes.
- La sismología e ingeniería sísmica son disciplinas en evolución; los avances tecnológicos han permitido la aparición de nuevos y mejores instrumentos de registro de temblores por una parte, y de más veloces y potentes computadoras por otra, lo que ha cambiado la forma del tratamiento de la información. Han surgido nuevas necesidades como la existencia de cálculos más complejos y la cantidad de datos a procesar ha crecido extraordinariamente. Ante este panorama no se debe considerar a ProAcel como una aplicación terminada, sino en progresión, que debe ser mejorada y extendida de forma tal que, cumpliendo con los objetivos planteados responda a las cambiantes necesidades del usuario y permita desde su ámbito contribuir al conocimiento del fenómeno sísmico y por ende a la mitigación de sus efectos tanto en seres humanos como en estructuras.

REFERENCIAS

1. **Fundación ICA**, "Experiencias Derivadas de los Sismos de Septiembre de 1985", Ed Limusa, México, 1988, p 13.
2. **Suárez R y Jiménez J**, "Sismos en la ciudad de México y el terremoto del 19 de Septiembre de 1985", Cuadernos del Instituto de Geofísica/2, México, 1988, p 19.
3. **Fundación ICA**, op cit, p 16.
4. **Mena E et al**, "Catálogo de Acelerogramas Procesados del Sismo del 19 de septiembre de 1985", parte I, Series del Instituto de Ingeniería, México, 1986.
5. **Carmona C et al**, "Catálogo de Acelerogramas Procesados del Sismo del 19 de septiembre de 1985", parte II, Series del Instituto de Ingeniería, México, 1987.
6. **Alcántara L et al**, "Catálogo de Acelerogramas Procesados del Sismo del 19 de septiembre de 1985", parte III, Series del Instituto de Ingeniería, México.
7. **Alcántara L et al**, "Catálogo de Acelerogramas Procesados del Sismo del 19 de septiembre de 1985", parte IV, Series del Instituto de Ingeniería, México, 1992.
8. **Alcántara L et al**, "Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes", Disco Compacto Volumen 1, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, 1977.
9. **Quaas R et al**, "Base Nacional de Datos de Sismos Fuertes. Catálogo de Estaciones Acelerográficas 1960-1992", Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, 1993.
10. **Quaas R et al**, "Base Nacional de Datos de Sismos Fuertes. Catálogo de Acelerogramas 1960-1993", Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, 1995.
11. **Quaas R et al**, "Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes. Actualización de los Catálogos de Estaciones a 1995 y Acelerogramas a 1994. Catálogo de los registros de los temblores del 14 de septiembre, 9 y 21 de octubre de 1995", Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México, 1996.
12. **Alcántara L et al**, "La Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes en CD-ROM", Séptimas Jornadas de Sismología e Ingeniería Antisísmica. 1^{er} Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, vol 1, Chile, 1997.

13. Prince J et al, "Procesamiento de acelerogramas obtenidos en 1974", Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1976, p 17.
14. Mena E y Carmona C, "TERRE: Sistema para proceso de acelerogramas", Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1986.
15. Mena E, "Sistema de procesamiento avanzado de acelerogramas para el CENAPRED", Informe RT-8, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, 1990, p 0-1.
16. Pressman R, "Ingeniería del Software. Un enfoque práctico", McGraw-Hill, España, 1997, p 230.
17. Ibidem, p 21.
18. Martin J y Odell J, "Análisis Orientado a Objetos", Prentice-Hall Hispanoamericana, México, 1994, p 16.
19. Budd T, "Introducción a la Programación Orientada a Objetos", Addison-Wesley Iberoamericana, USA, 1994, p 16.
20. Pressman R, op cit, p 370.
21. Martin J y Odell J, op cit, p 123.
22. Ibidem, p 21.
23. Pressman R, op cit, p 369.
24. Ibidem, p 387-422.
25. Ibidem, p 377.
26. Haykin S, "Sistemas de Comunicación", Nueva Editorial Interamericana, México, 1985, p 10-11.
27. Brigham E, "The Fast Fourier Transform", Prentice-Hall, USA, 1974, p 11.
28. Haykin S, op cit, p 38.
29. Brigham E, op cit, p 98.
30. Alcántara L, et al, "Rehabilitación de la Instrumentación Sísmica de la Presa Trigomil, en el Estado de Jalisco", Informe del Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 2000, p 18.

31. **Mena E**, op cit, p 4-3.
32. **Alcántara L**, op cit, p 11.
33. **Mena E**, op cit, p 3-5.
34. **Martínez Y et al**, "Dinámica Estructural", Universidad Autónoma de Zacatecas, México, 1983, p 103.
35. **Flores E**, "Sismicidad en Pinotepa Nacional", Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM, México, 1996, p 79.