Etapas del desarrollo instrumental en la época universitaria del Observatorio de Cartuja

Gerardo Alguacil
Instituto Andaluz de Geofísica. Universidad de Granada. 18071-Granada. alguacil@ugr.es

Abstract

The University of Granada assumed the management of Cartuja Observatory on 1971. By the end of this decade, only a small group of geophysicists worked there and a single photographic seismograph operated at the observatory. Since then, the sustained effort on instrumental design and development have led to the deployment of a number of permanent short-period (SP) seismic stations for local seismicity studies and broad-band (BB) stations; portable stations and networks and portable seismic arrays have been built and used for a number of field surveys on the Southern Spain, Canary Islands, Italy and the Antarctica. A brief history of these developments is presented in this paper.

Introducción

A finales de los 70, hay tres geofísicos investigadores trabajando en el Observatorio de Cartuja: Carlos López, Fernando de Miguel y Francisco Vidal. Los astrofísicos que anteriormente han estado presentes se han incorporado ya al Instituto de Astrofísica de Andalucía, del CSIC, o a departamentos de la Universidad. En el año 1980, Carlos López se marcha a Sudáfrica y se integra al Observatorio el autor.

Los sismógrafos que operan en la estación a finales de los setenta y desde 1966, como se ha indicado en otras contribuciones de este volumen, son tres componentes de corto periodo, de marca Askania, modelo Hiller-Stuttgart (Fig. 1), con periodo libre del péndulo alrededor de T_0= 1.5 s y galvanómetros (Fig. 1) de similar periodo, en montaje Galitzin y con registro fotográfico. Estos sismómetros tienen un periodo libre mecánico más corto, que se alarga por *astatización* con imanes auxiliares. Los registradores fotográficos originales de la casa (con galvanómetros internos y mecanismo regulador de velocidad de giro con péndulo) se habían substituido por un registrador de tres canales de motor síncrono, fabricado en el Observatorio de Toledo, y los galvanómetros se habían montado externamente, lo que obligaba a operar en cuarto oscuro. Se utiliza una velocidad de desarrollo de 60 mm/min (Fig. 2). Una de las tareas que primero se llevan a cabo es la clasificación y organización del archivo de bandas. Desgraciadamente, cuando la Universidad de Granada se hace cargo del Observatorio en 1971, las bandas originales anteriores ya se habían perdido.

Se sigue un proceso de rutina típico de observatorio: identificación y temporización de las fases de sismos próximos y telesismos. No se cuenta en una primera etapa con escala de magnitud para la zona, ni se conoce la curva de amplificación de los instrumentos, entre otras razones porque han sufrido múltiples reparaciones y ajustes. Por esas fechas, es el Observatorio Central de Toledo el que asigna rutinariamente las magnitudes, ya que cuenta con una estación estándar WWSSN. Las fases observadas se notifican entre los diversos observatorios españoles (Ebro, Toledo, San Fernando, Málaga, Alicante, Almería...) mediante telegramas

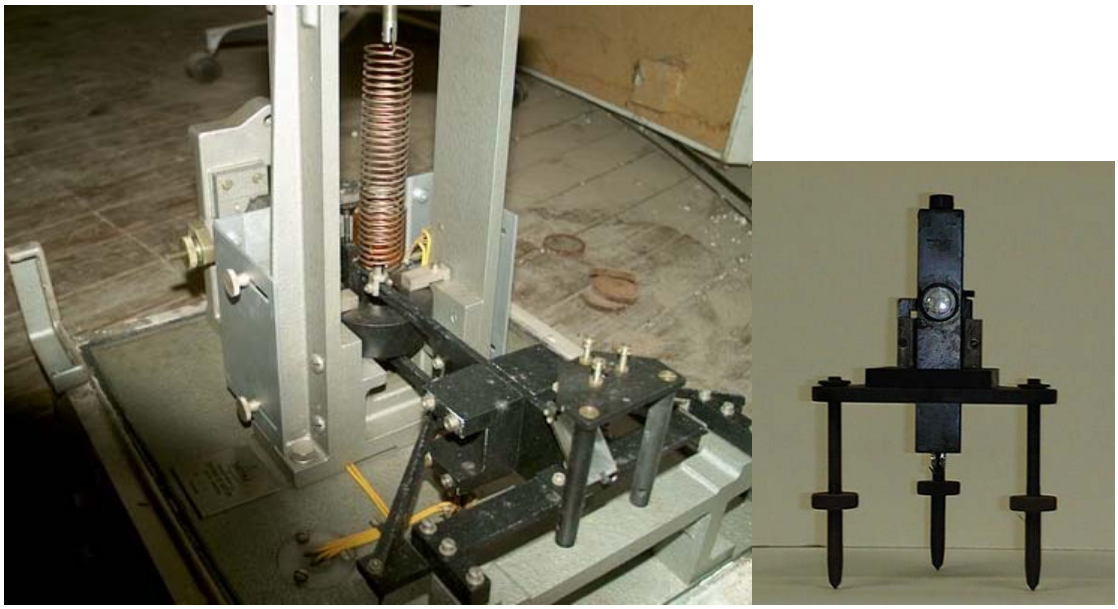

Figura 1.- Izquierda: sismómetro modelo Hiller-Stuttgart vertical sin su tapa. Este sensor funcionó en el Observatorio de Cartuja hasta 1986. Se aprecia el muelle y la masa. En primer término, el eje y el espejo para medida del periodo del péndulo, con ayuda de un anteojo. Derecha: galvanómetro utilizado con este sismómetro. Es el original del registrador de Askania, montado sobre una base exterior.

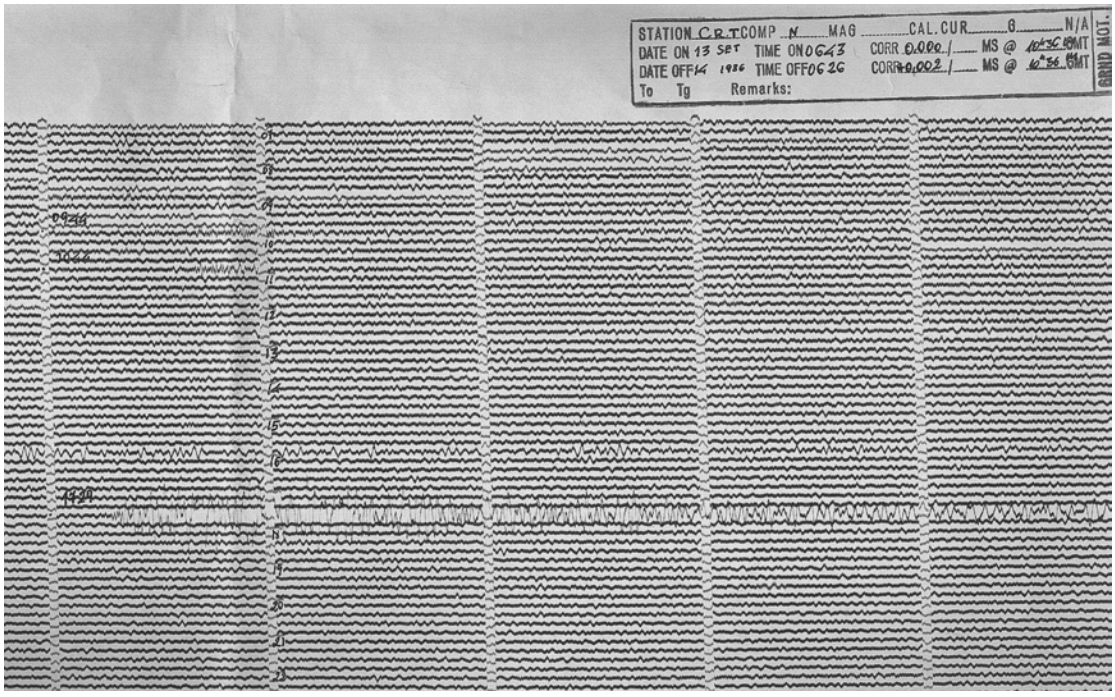

Figura 2.- Ejemplo de banda fotográfica correspondiente a los sismógrafos Hiller. Las marcas de tiempo están espaciadas 60mm.

codificados (Willmore, 1979) según las normas internacionales. Como parte de un convenio de colaboración, el Instituto Geográfico Catastral[1], suministra el papel y los consumibles fotográficos. Muchas de las bandas se envían a la sede central del mismo

[1] Hoy Instituto Geográfico Nacional.

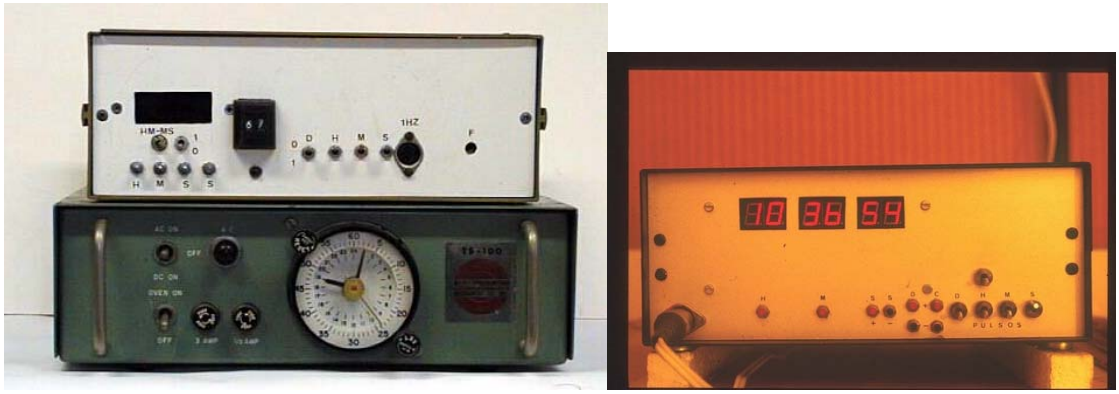

Figura 3.- Izquierda: (abajo) reloj Sprengneter, con oscilador a cuarzo y motor síncrono y (arriba) reloj digital fabricado en el Observatorio de Marina. Derecha: el reloj maestro, construido en el Observatorio en 1980 con lógica CMOS. Utiliza un oscilador de cuarzo termostatizado y tiene salida optoacoplada para el control de los relés de accionamiento de las marcas de tiempo del registro fotográfico.

en Madrid. A finales de esta década de los 70, este Instituto realiza una calibración absoluta de los equipos Hiller en todos sus observatorios y los colaboradores (los equipos de Cartuja son propiedad de dicho Instituto y están cedidos), entre ellos los de la estación CRT. Se obtienen curvas con amplificaciones máximas en torno a ocho mil veces.

La temporización de los registros se realiza con un reloj Sprengnether de motor síncrono con oscilador de cuarzo y contactos mecánicos. Se mejora el año 78 con un reloj digital construido en el Observatorio de Marina de San Fernando (hoy Real Instituto y Observatorio de la Armada), con tecnología lógica TTL. Aunque funciona por algún tiempo, sufre de frecuentes saltos, que se atribuyen a los transitorios provocados por los relés electromecánicos de marcas de tiempo y a las deficientes condiciones de las líneas eléctricas del pabellón de sismología. En el año 1980, se decide construir uno nuevo (Fig. 3) con tecnología CMOS, más inmune al ruido y con menor consumo. Se toman precauciones adicionales, como opto-acoplar la salida de control de los relés de marcas de tiempo del registrador fotográfico. La sincronización de los relojes se realiza con la ayuda de un osciloscopio y con las señales de una emisora horaria de onda corta, la RWM de Moscú, en 15 MHz, aunque la recepción es difícil o imposible en muchas ocasiones, dependiendo de las condiciones de propagación atmosférica.

Sismógrafos electrónicos

La década de los setenta es de baja actividad en la zona, pero el 20 de marzo del año 1979 comienza una serie sísmica (Vidal et al., 1979) de numerosos terremotos sentidos y que causan la consecuente alarma en la población (Vidal y De Miguel, 1979). Con esta circunstancia se ponen especialmente de manifiesto las carencias en instrumentación del Observatorio. Una de las primeras evidencias es la necesidad de un registro visual inmediato, que no requiera el proceso de revelado, fijado y secado de las bandas fotográficas.

En otro orden de cosas, por estas fechas se produce un acontecimiento que resulta trascendente para el futuro del Observatorio. En los últimos años, el director del

Figura 4.- Electrónica de la estación de campo telemétrica, versión 1980. Comprende cuatro módulos: de izquierda a derecha, transmisor de radio, alimentación simétrica, VCO y preamplificador. El conjunto se aloja en una caja con aislamiento térmico y ésta en una caseta metálica (ver fig. 5).

mismo había sido, de oficio, el decano de la Facultad de Ciencias. Cuando accede al cargo el profesor D. Bernardo García Olmedo, vista la falta de medios, decide plantear al rectorado la situación y éste acuerda asumir directamente la responsabilidad. Se hace cargo de la dirección el Vicerrector de Investigación, profesor D. Rafael Vara Thorbeck, delegando las competencias científicas y algunas administrativas en Fernando de Miguel, como "profesor responsable". Por primera vez, el Observatorio cuenta con un presupuesto de un millón de pesetas. Por otra parte el rector, profesor D. Antonio Gallego Morell, decide realizar reformas de acondicionamiento en el Observatorio, para rehabilitar zonas deterioradas y abrirlas al uso. Esto permite ampliar la zona de trabajo a varias dependencias que habían permanecido cerradas hasta entonces.

El nuevo presupuesto permite la adquisición de un sismómetro Kinemetrics, modelo Ranger SS-1, de periodo 1 s, y el desarrollo de un prototipo de preamplificador sísmico con el amplificador operacional de instrumentación LM725. Tras un tiempo de prueba en el Observatorio, se diseña un circuito VCO y un demodulador de FM y se adapta un *kit* de transmisor y receptor para la banda de 170 MHz. Con esto se configura un prototipo de estación sísmica telemétrica (Fig. 4). Se instala en Pico Herrero (Fig. 5), en la Sierra de Albuñuelas, en 1981. En la estación receptora, se adapta la mecánica y se añade la electrónica a un antiguo registrador fotográfico, para registro con plumilla controlada por servomotor.

Siguen cuatro estaciones más, que se construyen durante el año siguiente. Simultáneamente, el mecánico del Observatorio de Toledo, D. Gregorio Alonso, construye la parte mecánica de cuatro registradores de plumilla, proyectados conjuntamente por Francisco Vidal y el autor. Como particularidad, se diseña para la plumilla un sistema de inscripción rectilínea, en lugar de circular. Se añaden en Cartuja los circuitos de control y a finales de 1982 funcionan (Fig. 6) las estaciones PHE, SMO, LOJ y TEJ, todas situadas en alturas sobre los bordes de la Depresión de Granada. Colabora en el montaje y la instalación Vicente Sabido. Es la primera red sísmica radiotelemétrica de microsismicidad que opera en la Península Ibérica.

Figura 5.- Caseta de la estación APHE, originalmente designada como HER, en la Sierra de Albuñuelas. En el interior se aloja la batería, el sensor Ranger SS-1 y la electrónica.

Figura 6.- Registradores en su segunda versión (la primera fue una adaptación de los fotográficos). La electrónica (parte superior) está organizada en tarjetas cableadas entre sí y los conmutadores de los filtros y de ganancia son mecánicos.

Primeros medios de cálculo

Desde el año 1980 se había adquirido un microcomputador CBM 3032, con unidad doble de disquete e impresora. Funciona con un intérprete BASIC en ROM. Esta máquina hace posible iniciar una rutina básica de proceso de datos, que programa sobre todo José María Guirao bajo las directrices de Fernando de Miguel y Francisco Vidal. Se ponen a punto programas de localización, catálogo, boletín y mecanismos focales. Anteriormente a esto, los medios de cálculo del Observatorio consistían en una calculadora programable HP-97, en la que incluso se llegó a realizar un programa de localización hipocentral geométrico para un modelo de medio homogéneo semi-infinito.

En 1984 se adquiere un miniordenador PDP 11/23, que supone un salto cualitativo, ya que hace posible trabajar con programas FORTRAN estándar, por ejemplo para localización hipocentral o mecanismos focales. Se adaptan los programas de proceso y se escriben otros nuevos.

La versión 84 de la estación sísmica

Contemporáneamente se diseña una nueva versión de la estación fija de campo (CRT84) y de la estación receptora y se instala el nuevo prototipo en la nueva APN. Paulatinamente, se substituyen con los nuevos equipos las otras estaciones y en 1988 ya operan todas con la nueva versión. También la estación CRT, situada en el Observatorio, pasa a ser de nuevo diseño, con un sensor Ranger SS-1, y en 1986 se abandona el registro fotográfico, ya que el Instituto Geográfico había suprimido el suministro de material consumible. Básicamente, el diseño de la estación de campo es más compacto: una sola placa (Fig. 7) incluye preamplificador, VCO, unidad de calibración automática diaria y fuente de alimentación. Solo el transmisor de radio y el regulador de carga de la batería con panel solar son independientes.

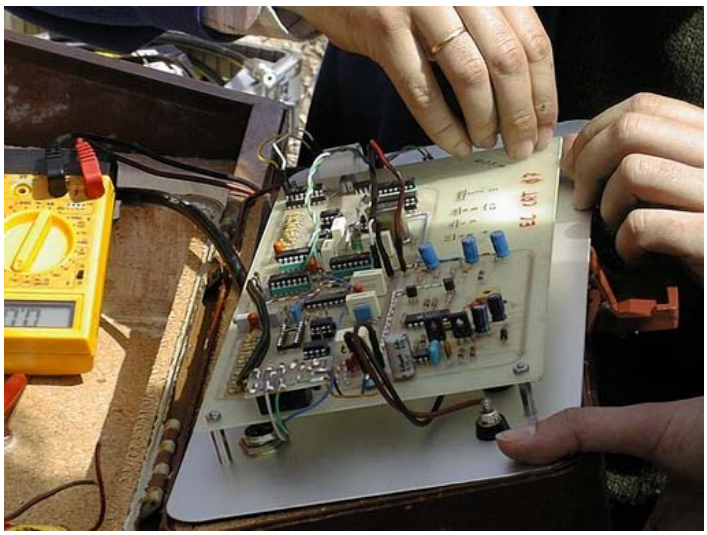

Figura 7.- Interior de la estación de campo modelo 84. Se ve la monoplaca, que incluye preamplificador, VCO, unidad de calibración automática diaria y fuente de alimentación.

En la estación central, los registradores (Fig. 8) son ahora modulares, con las distintas unidades (demodulador, filtros, amplificador de servomotor) enchufadas en un panel de fondo que hace de *bus* analógico. Cada registrador puede montar varias unidades de filtros, configurables como paso-altas, paso-bajas, paso-banda o rechazo de banda. Se han eliminado los conmutadores mecánicos para la amplificación y la frecuencia de los filtros, que causaban frecuentes problemas, y ahora el control es digital. Las plumillas de tinta presentan numerosos fallos y se decide sustituir el registro por papel termosensible. Se desarrollan plumillas térmicas y un sistema de control de temperatura de la plumilla en función de la velocidad de la traza. El giro de los tambores y el arrastre de la plumilla se realiza con motores de pasos controlados por el oscilador patrón, en sustitución de los motores síncronos anteriores. Esto permite mayor flexibilidad y diferentes velocidades de desarrollo.

Los radioenlaces de la primera generación, de diseño simple, se substituyen progresivamente por nuevas unidades de características homologables, dentro de las necesidades de potencia y consumo bajos. Estos fueron diseñados y construidos por el colaborador W. Miguel Martín.

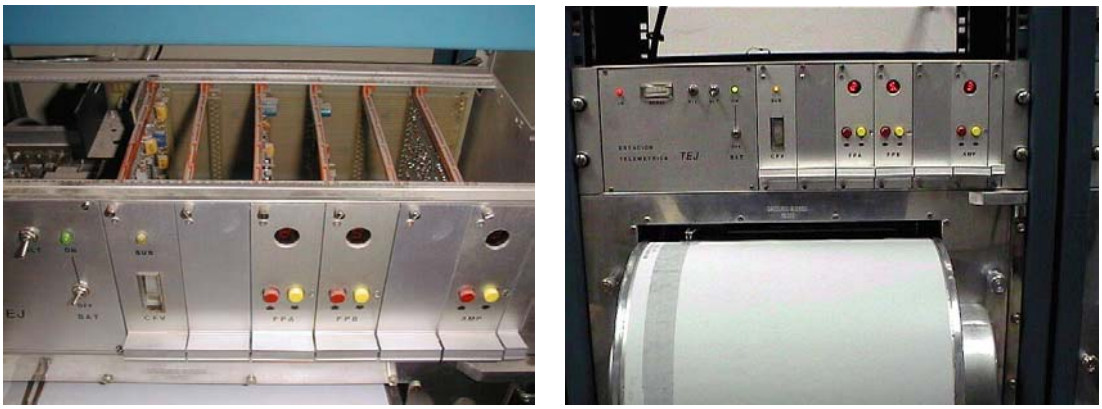

Figura 8.- Izquierda: la electrónica de la estación registradora, versión 84, es modular. Las diferentes unidades se enchufan en el panel de fondo. Pueden verse, desde la izquierda, el panel de conmutadores con el receptor de radio, el demodulador de la subportadora (FVC), dos unidades de filtros y el amplificador de servomotor de plumilla. Derecha: vista del registrador.

En todo este nuevo proyecto, como en otros posteriores, es fundamental la aportación de Antonio Martos, técnico incorporado al Observatorio en 1984, que realiza las tarjetas de circuito impreso, monta las unidades y hace la integración del equipo.

También en 1984 se incorpora José Manuel López, que ayuda en el montaje de los equipos. Más tarde su labor se centra en el proceso de los datos.

Calibración

En la fase de diseño se estudia la respuesta del sistema que se desea, por lo que las funciones de transferencia nominales de cada elemento y, por tanto, del conjunto son bien conocidas. Por otra parte, los pulsos de calibración u otras señales de excitación permiten contrastar la respuesta de forma empírica, sin suponer un modelo determinado, excepto por el transductor que excita la fuerza. Generalmente se emplea la bobina auxiliar de calibración, pero esto plantea algunos inconvenientes, ya que aparecen señales espurias inducidas a la salida. Así se diseñaron esquemas de calibración que evitan esta bobina. Complementariamente a este tipo de técnicas puestas a punto, se planteó la conveniencia de un contraste totalmente empírico de la amplificación dinámica. Con este fin se realiza en 1996 un proyecto que consiste en la construcción de una pequeña mesa vibrante vertical (Fig. 9) para excitar los sismómetros con un movimiento conocido. La mesa dispone de dos plataformas: en una se coloca el sensor bajo prueba y en la otra un sismómetro que actúa como *reactor*. Es decir, al mover la masa de éste con una señal en su bobina, toda la mesa se mueve por reacción. El movimiento de ésta se mide con un fasímetro ultrasónico diseñado al efecto. Se limita el movimiento a un grado de libertad vertical con un sistema diseñado al efecto, por medio de flejes horizontales, que constituyen la única sujeción del conjunto móvil e impiden su desplazamiento horizontal.

Red portátil y primer sistema de adquisición de datos

Los registros analógicos no resultan adecuados para análisis de detalle y así, con ocasión de un proyecto sobre sismicidad de las Alpujarras financiado por la CAICYT, se construye una red telemétrica portátil con registro digital de eventos. El sistema de telemetría (Fig. 10) es idéntico al de las estaciones fijas, pero la estación central de

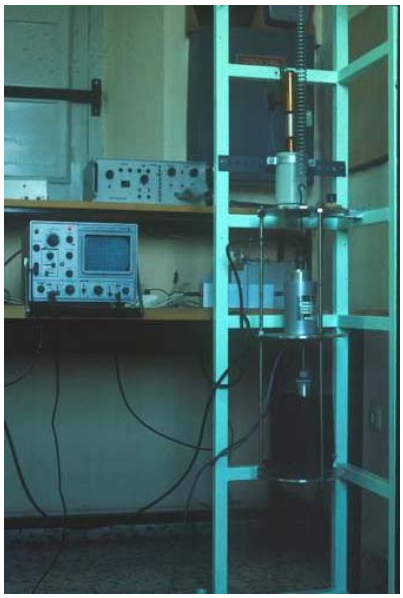

Figura 9.- Mesa vibratoria vertical. Sobre la plataforma inferior se sitúa el sismómetro a calibrar; en la central, uno auxiliar, que mueve la mesa por reacción; en la superior está montado el transductor de posición ultrasónico.

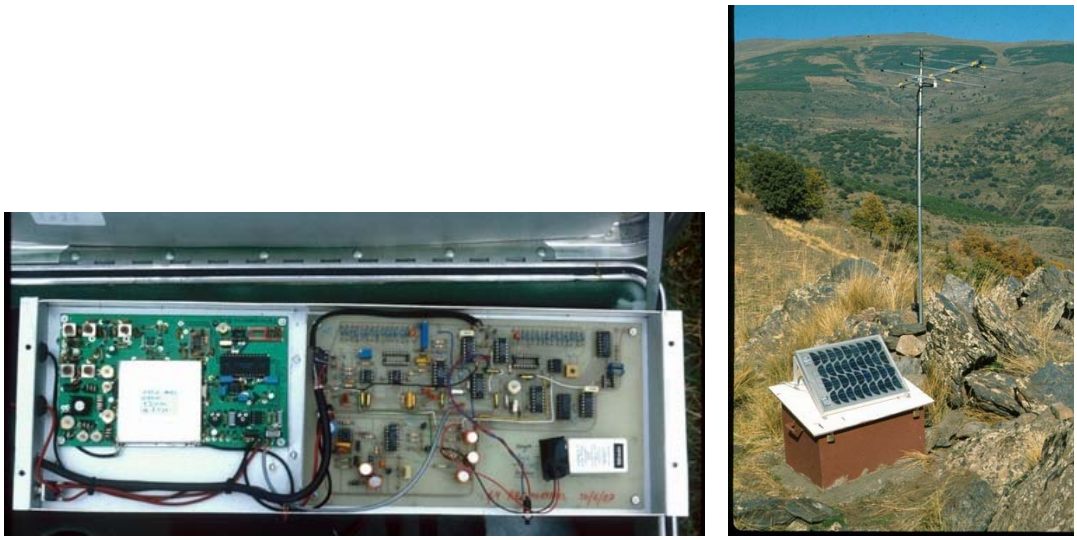

Figura 10.- Izquierda, electrónica de la estación de campo de la red portátil. Se muestra el transmisor de radio y la placa principal, que incluye el resto de la electrónica. Derecha, una vista de una de las instalaciones de esta red portátil, con la caseta en cuyo interior se aloja el sensor y la electrónica, el panel solar (el techo de la caseta es blanco para aprovechar la luz difusa, ya que el panel es bifacial) y la antena de transmisión.

registro (Fig. 11) incluye un sistema de adquisición de datos, controlado por microprocesador, con un conversor analógico-digital de 12 bits.

El registro de los eventos (declarados en tiempo real por los algoritmos de disparo) se hace en cinta *streamer* de 20 Mbytes de capacidad. Dispone de pantalla LCD y de una pequeña impresora que emite informes. Es responsable de este desarrollo Gonzalo Olivares (Olivares, 1988). Los radioenlaces que se montan, con síntesis de frecuencia, son debidos de nuevo a W. Miguel Martín.

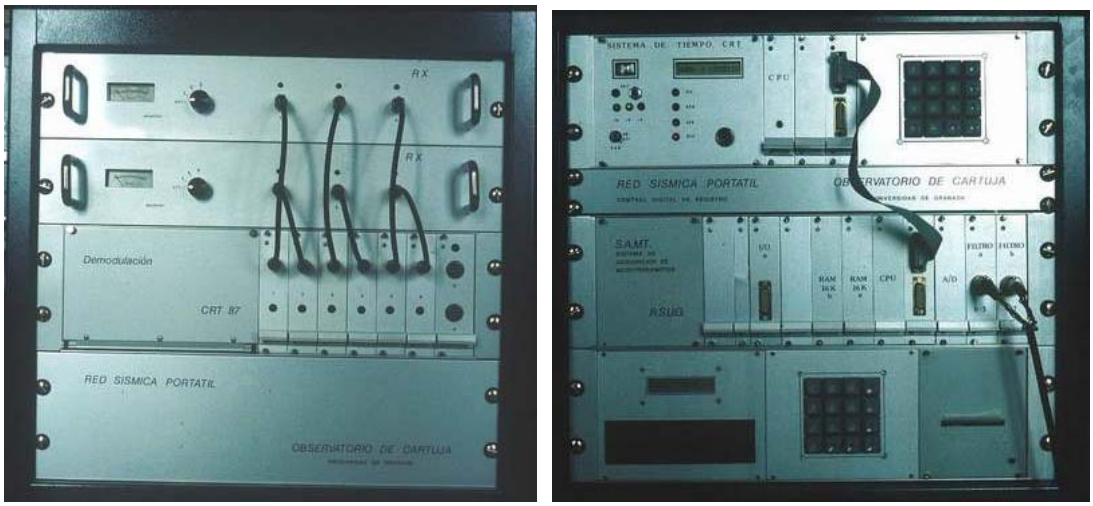

Figura 11.- La unidad central de la red portátil. Izquierda: receptores y demoduladores. derecha: sistema de adquisición de datos y registro digital en cinta, con impresora para informes. La unidad superior es el reloj con receptor horario.

El sistema monta un reloj maestro controlado por microprocesador, asimismo diseñado en el Observatorio, que se sincroniza con la emisora Radio France Inter, cuyo receptor se ha diseñado y construido asimismo. Realizó este trabajo Francisco Gómez Mula.

Tras esta primera campaña, la red portátil se despliega en otras en la Depresión de Granada y en la Axarquía de Málaga, si bien con modificaciones en el sistema de registro.

Sistema de adquisición de datos basado en PC

Por esta época ya se ha generalizado el uso de ordenadores personales *compatibles IBM*, lo que ha establecido un estándar de hecho. Durante 1987, José María Guirao desarrolla un programa de adquisición de datos para PC, con una tarjeta de conversión AD de bajo coste con ocho canales y resolución de 14 bits. Es un sistema de tiempo real que funciona en DOS en un simple PC-XT. Se añade una tarjeta de reloj de tiempo real, ya que el interno del ordenador no tiene suficiente resolución. Aunque el MS-DOS no es un sistema operativo de tiempo real, el programa está diseñado de modo que la adquisición de datos está controlada por una interrupción cíclica de alta prioridad, con lo que se consigue el mismo efecto.

En 1988 se dispone de los primeros registros digitales de la red permanente. Se construyen tarjetas de filtros anti-contaminación (*antialiasing*) de siete polos con respuesta de Butterworth para adaptar las señales analógicas a este sistema. Se traslada la central de registro (Fig. 12) ya con el nuevo sistema modular a su ubicación actual en el ala sur.

En 1991 se construyen cinco nuevas estaciones (Fig.13) con el mismo diseño y

Figura 12.- La central de registro. A la izquierda del grupo de registradores helicoidales, el mueble que aloja el reloj maestro, el oscilador patrón, la interfaz con el GPS y los filtros anti-alias. En la parte baja de cada mueble, la fuente de alimentación ininterrumpida y el sistema de control de los motores de pasos. Los PC son dos sistema de adquisición de datos, uno de respaldo del otro.

Figura 13.- Una estación de campo de la red local de Almería. Estas estaciones disponen de una infraestructura de obra y de cercado, gracias a la colaboración de la Diputación Provincial de Almería. El registro se centraliza en el campus universitario de La Cañada.

con radio-enlaces comerciales en la banda de UHF y se instalan en la provincia de Almería. La estación central se sitúa en el entonces Colegio Universitario de Almería, dependiente de la Universidad de Granada. Se le dota de un sistema de adquisición de datos, basado en PC, idéntico al de Granada.

Otro diseño de interés son cuatro estaciones sísmicas digitales portátiles (Fig. 14) con sistema de adquisición controlado por PC y con tiempo GPS. Contribuyen a este desarrollo los becarios José Luis Correa y Agustín Gutiérrez, que escriben el nuevo programa de adquisición. También adaptan el de la estación central, con una nueva interfaz gráfica.

El sincronismo con el tiempo universal (TU)

El *problema del tiempo* es uno de los que más dificultades ha provocado en todas las campañas sísmicas y en estaciones fijas en España hasta bien entrada la década de los 90.

En efecto, la ausencia de emisoras de tiempo permanentes en España[2] hace que se utilicen emisoras europeas más distantes, como se ha dicho. Por las dificultades y la variabilidad de la recepción en onda corta, se opta por emisoras en onda larga, como la HBG suiza, la DCF alemana, pero también llegan muy débiles sus señales. Durante un tiempo se trabaja en un receptor de Radio France Inter, una emisora de radiodifusión en AM que añade señales horarias modulando la fase de su portadora. Francisco Gómez Mula consigue poner a punto un prototipo que funciona, pero al poco tiempo la emisora cambia su frecuencia y su sistema de modulación y se abandona el proyecto.

Cuando comienza a operar el sistema de registro digital, se considera obsoleto el reloj maestro, que sólo puede proporcionar marcas cada minuto. Se adquieren receptores Telecode para la MSF, emisora situada en Rugby, Reino Unido, que transmite en 60 KHz, y se usan con éxito durante un tiempo, tanto en la estación central de Cartuja como en la de Almería. Más tarde, la recepción empeora y se adquieren dos receptores para el sistema Omega, una serie de estaciones terrestres de ayuda a la navegación, que transmiten entre 10 y 12 KHz; aunque no transmiten señales horarias codificadas, suprimen su portadora en ciclos sincronizados con el Tiempo Universal y permiten mantener el reloj en sincronismo, si se conoce la hora aproximada. Estos receptores incluyen un reloj asociado, que proporciona las marcas de tiempo a los registradores.

Todos estos sistemas de onda larga o muy larga, debido a su banda muy estrecha, proporcionan precisiones a lo sumo de la centésima de segundo. En 1995 se adoptan los receptores GPS, que suministran código horario y pulsos de sincronismo varios órdenes de magnitud más precisos. Debido a que la antena receptora está en la terraza, se producen frecuentes interferencias en los pulsos por segundo que controlan el reloj y es necesario conectarlos mediante una interfaz RS-485, construida al efecto. Este mismo tipo de conexión se utiliza más adelante en estaciones de banda ancha situadas en cuevas, donde el receptor GPS está necesariamente alejado decenas o centenares de metros. Se construye una interfaz para sincronizar el reloj patrón y el del sistema de adquisición de datos con el GPS.

[2] El Observatorio naval de S. Fernando, que da la hora oficial española, en esa época transmite en onda corta señales horarias durante una media hora diaria, pero ni en Cartuja ni en otros observatorios de la Península se recibe esta señal, por las condiciones de propagación en esta banda.

Figura 14.- Estación digital portátil autónoma. Está controlada por un PC portátil, en cuyo disco graba los registros. Se muestra la caja que aloja el sistema de adquisición de datos y el receptor GPS (muy voluminoso en estas primeras unidades) y la alimentación. También se transportan en ella los sensores de 1Hz y sus cables.

La red de banda ancha

Los sismómetros de banda ancha que se adquieren a partir de 1994, con una financiación de infraestructura de la CICYT, requieren sistemas de adquisición de más resolución que los hasta entonces existentes, para aprovechar su amplio margen dinámico. Se adquiere una unidad de sistema de adquisición Quanterra, que se instala en los túneles de las instalaciones del Ministerio de Defensa en Sierra Elvira, pero se aborda el diseño y construcción de sistemas propios para las demás estaciones. El resultado es una unidad (Fig. 15) de registro continuo con resolución nominal de 24 bits (18-20 efectivos), interrogada via modem, bien sea con línea telefónica física, bien con teléfono celular en aquellos emplazamientos en que no existe tendido telefónico. Esta generación de estaciones funciona también, con algunas modificaciones, en varias campañas antárticas en las islas de Decepción y de Livingston. Antonio Peregrín desarrolla los programas de adquisición de datos e interrogación remota, a los que posteriormente hace algunas modificaciones Miguel Abril.

Las antenas sísmicas o *arays*

Otra importante vía de desarrollo instrumental se pone en marcha con ocasión de un proyecto europeo sobre volcanes-laboratorio, que incluye el Teide. El Prof. Edoardo del Pezzo, de la Universidad de Salerno por entonces, con quien existe ya una larga colaboración, propone el uso de *arrays* (antenas sísmicas) en este proyecto. Se colabora con el grupo de volcanología del Museo Nacional de Ciencias Naturales (Prof. Ramón Ortiz) en el diseño de un sistema de *arrays* portátiles (Fig. 16 y 17). Cada módulo comprende un sistema de adquisición de datos de ocho canales y 16 bits, controlado por un PC portátil de bajo consumo, con tiempo GPS. Usan pequeños geófonos de 4.5 Hz, con la respuesta extendida electrónicamente hasta 1 s (Fig. 14). Varios de estos módulos se despliegan en el área de estudio para conformar el dispositivo completo.

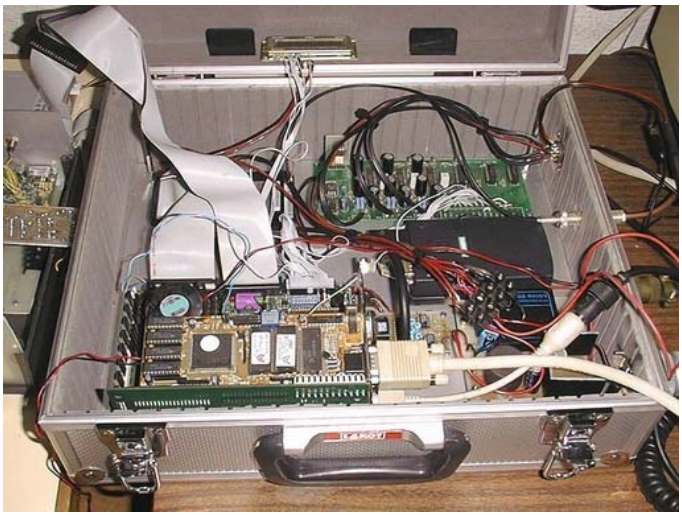

Figura 15.- Estación digital autónoma de registro continuo. Contiene un PC industrial con su disco, el módulo de adquisición de datos, un receptor GPS para el tiempo y un modem para su interrogación telefónica. En el ejemplo que se muestra, el modem es un terminal de telefonía celular GSM para datos.

Figura 16.- Izquierda: sistema de adquisición de datos del array. La grabación y el control se realiza en un PC portátil. Derecha: los sensores son geófonos de 4.5 Hz, con un preamplificdor-ecualizador asociado para extender su respuesta a baja frecuencia.

Figura 17.- Arrays deplegados en Isla Decepción (Antártida). Izquierda: La unidad de adquisición de datos está protegida por una tienda de campaña y en ella convergen los cables de los sensores, que habitualmente no superan los 300m de longitud. Derecha: Unidad central de un array en operación. En este caso está montado en el interior de una nevera, para aislamiento térmico.

Desde este experimento inicial en el Teide, los *arrays* han realizado numerosas campañas en la Antártida (isla Decepción), el Vesubio, el Etna y Stromboli (cfr., p.e., Almendros, 2002).

Un ordenador de campo para adquisición de datos

Durante la estancia en el Observatorio del profesor Jens Havskov, de la Universidad de Bergen, en sabático durante el curso 2000-2001, además de adoptar el paquete SEISAN (Havskov & Ottemöller, 1999) de proceso de datos y migrar toda la antigua base de datos sísmica, se inicia con su impulso el desarrollo de un sistema de PC de campo, SeisPC, con bajo consumo y apto para adquisición de datos. Es un sistema monotarjeta (Fig. 18), en el que se conecta la CPU industrial de BUS PC-104. Parte de la filosofía del diseño se basa en que los sistemas de adquisición de datos, especialmente los destinados a estaciones BB, rara vez se usan a la intemperie, sino en el interior de cuevas, túneles, etc. Por tanto no necesitan cajas y conectores estancos de calidad militar, que encarecen considerablemente el diseño. Así, todos los conectores necesarios están montados en la propia tarjeta, eliminando el engorroso cableado. Desde luego, siempre es posible montar el conjunto en una caja con el nivel de protección que se desee. Contribuye eficazmente al diseño práctico Javier Moreno.

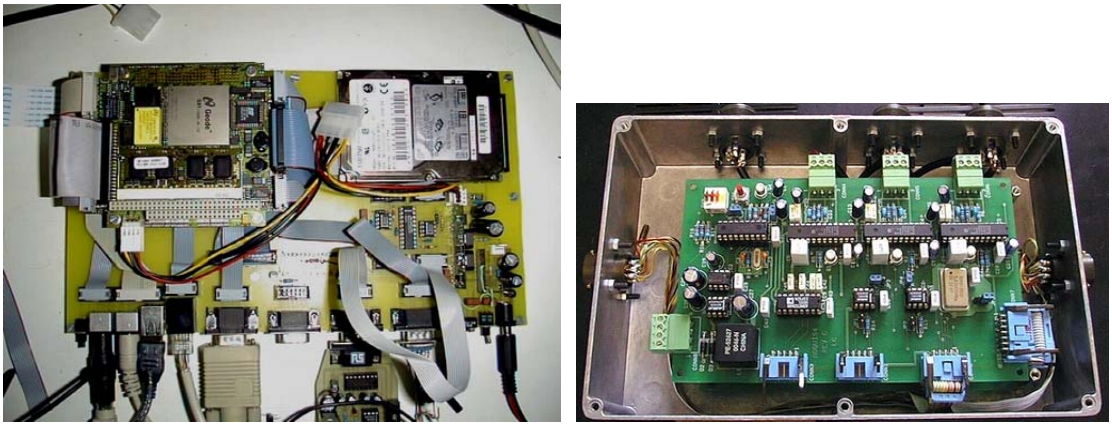

Figura 18.- Izquierda: Placa de *SeisPC*, un PC de adquisición de datos diseñado para bajo consumo y fácil construcción.. Derecha: Tarjeta *Seisad18* de conversión AD y tres canales. Puede trabajar con un generador de reloj sincronizado con GPS (no mostrado), de modo que el muestreo sea síncono entre varios módulos, una característica necesaria para los arrays. Estos diseños se ponen a disposición de otros grupos como *dominio público*, con la documentación necesaria.

También se reforma la tarjeta (Fig. 18) de conversión analógica-digital de tres canales y 24 bits nominales (18-20 efectivos, dependiendo de la frecuencia de muestreo), para incorporar un protocolo de comunicación bien definido y poder usarla con el programa de adquisición de datos de dominio público SEISLOG (Utheim et al., 2001, Universidad de Bergen). Ambos desarrollos se plantean como un diseño de bajo coste y también de dominio público, para lo cual se documentan en detalle, de modo que sea posible su reproducción por terceros (Alguacil et al., 2002).

Las nuevas dotaciones de fondos de desarrollo europeos hacen posible en 2001-2002 plantear el despliegue de nuevas estaciones de banda ancha y mejorar las existentes. Se usan sensores Sreckeissen STS-2, con conversores AD de Earth Data, de

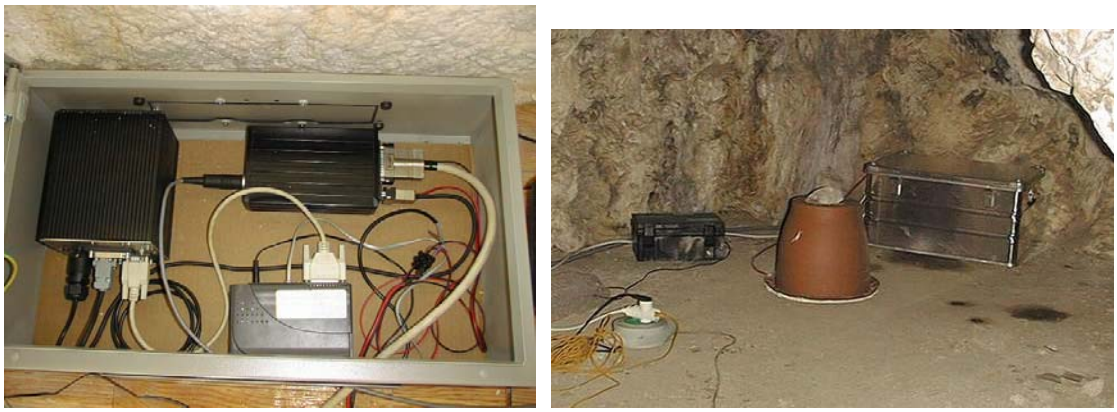

Figura 19.- Izquierda: la electrónica de la estación de banda ancha Santiago de la Espada. Puede verse a la izquierda el PC SeisComp que controla todo, en la parte superior el digitalizador de 24bits y tres canales y debajo un modem telefónico para interrogación. Derecha: Conjunto de la estación BB de la Cueva de Nerja. El sensor, en el centro, protegido con una cubierta estanca. La caja a la derecha contiene la electrónica y a la izquierda se ve un acelerógrafo digital.

resolución efectiva 24 bits, y el sistema SEISLOG funcionando en un PC SeisComp o SeisPC. La interrogación se realiza automáticamente mediante el sistema SEISNET (Ottemöller & Havskov, 1999) a través de línea telefónica o teléfono celular GSM.

Ejemplos de estas nuevas estaciones de última generación pueden verse en la figura 19.

Otros desarrollos

La experiencia adquirida en el campo de la instrumentación sísmica ha impulsado la colaboración en diseños encargados por centros externos. Son ejemplos significativos de éstos las antenas sísmicas de los *Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS)* (Abril et al., 1999; Amorusso et al., 1997), permanente, y la del Vesubio (Abril et al., 2002), portátil, ambos desarrollos originales.

El *array* del Gran Sasso (Fig. 20) está montado en las instalaciones subterráneas del LNGS, y cada estación triaxial está controlada por un PC. Cada grupo de cuatro se comunica con un PC nodal por línea serie y los nodales lo hacen por *ethernet* con el

Figura 20.- Antena sísmica del LNGS. Izquierda: una estación. Se pueden ver el PC industrial (caja esquina superior dcha., la tarjeta de conversión AD y los módulos de comunicaciones RS-485 y de PLL para generar la frecuencia local a partir de la piloto. Derecha: módulo de reloj central, que se sincroniza con un patrón atómico externo y genera la frecuencia piloto para las estaciones.

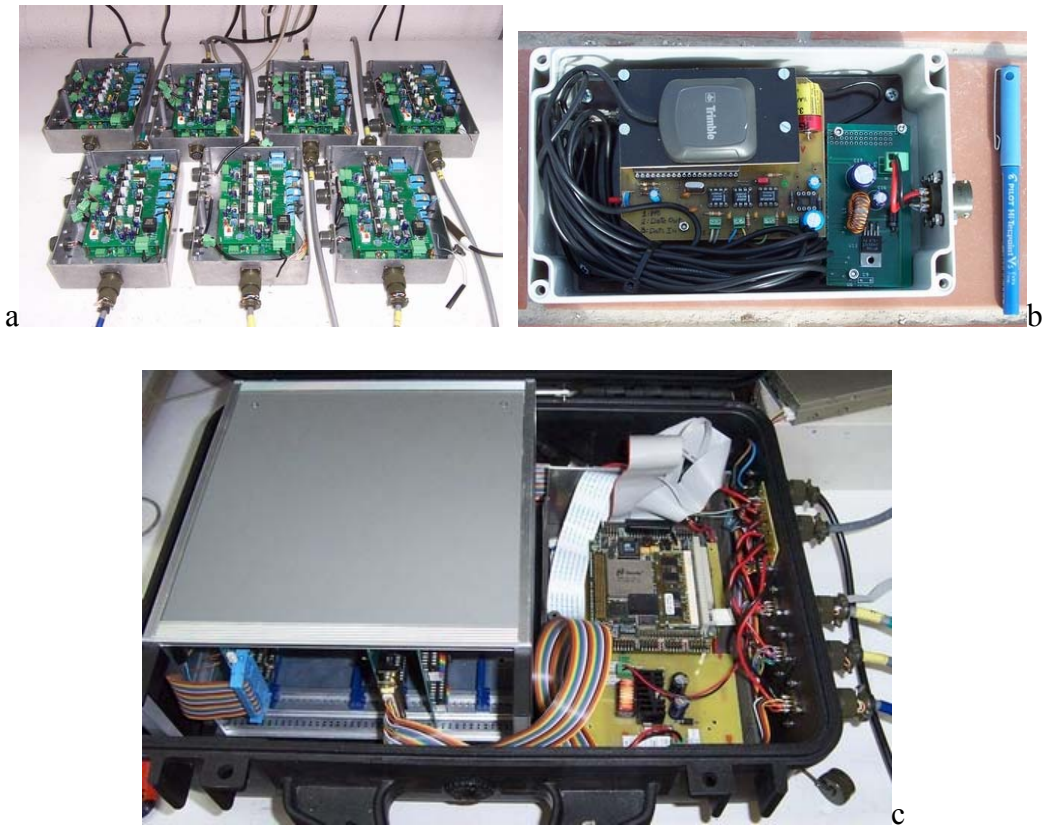

Figura 21.- Antena sísmica portátil del Vesubio. a) Conjunto de siete estaciones para un módulo. b) Unidad de reloj sincronizado con GPS. c) Estación central del módulo, con PC industrial PC-104.

ordenador central. Todas las estaciones funcionan sincronizadas con una frecuencia de reloj común, generada a partir de una piloto más baja que se transmite por cable, y muestrean simultáneamente.

El *array* del Vesubio (Fig. 21) está optimizado para bajo consumo. Está compuesto de módulos que controlan un grupo de hasta dieciséis estaciones triaxiales, con conversores AD individuales. El muestreo es asimismo síncrono, por medio de osciladores enganchados en fase entre sí con ayuda de pulsos de sincronismo del GPS.

Muchos otros diseños y construcciones relacionados con la instrumentación se han realizado en la época universitaria del Observatorio. Unos son complementarios de la instrumentación descrita, para resolver multitud de pequeños problemas o necesidades, otros han sido incluso instrumentos de laboratorio que en su momento era más viable construir que adquirir.

Se han descrito sucintamente aquellos instrumentos que han requerido el diseño de alguna parte o elemento. La actual dotación del Observatorio, asociado como sede al Instituto Andaluz de Geofísica y Prevención de Desastres Sísmicos desde la creación de éste en 1989, incluye además una red de acelerógrafos y una serie de instrumentos de exploración geofísica, como georrádar, equipo de sísmica de reflexión y refracción superficial, etc.

Agradecimientos

El autor ha descrito resultados del trabajo de un grupo y de algunos colaboradores esporádicos. Además de las personas citadas en el texto, han contribuido a las realizaciones instrumentales quienes las han promovido con sus ideas, han procurado los medios de uno u otro tipo para hacerlos posible, han trabajado en su construcción e instalación y han explotado los datos resultantes en numerosas publicaciones científicas.

Referencias:

Abril, M., Alguacil, G., De Luca, G., Scarpa, R. (1999): El dispositivo (*array)* sísmico subterráneo de alta resolución del Gran Sasso. *I Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica***.** Universidad de Almería-Instituto Geográfico Nacional. [CD]. Almería.

Abril, M. , Martini, M. , Alguacil, G., De Cesare, W. (2002): Diseño de una antena sísmica portátil de alta resolución para el volcán Vesubio (Italia). *Simposium Cien años de sismología en Granada*. [CD]. Granada.

Alguacil, G. (1996): *Los instrumentos de una red sísmica local telemétrica para microterremotos. La Red Sísmica de la Universidad de Granada.* Tesis doctoral. Universidad de Granada. 238 pp.

Alguacil, G., J. Havskov, M. Abril, M. Martíni, J. Moreno, A. Martos (2002): Equipos de dominio público para adquisición de datos sísmicos. *III Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica.* Universidad de Valencia-Instituto Geográfico Nacional. (en prensa).

Almendros, F.J. (2002): *Análisis de señales sismo-volcánicas mediante técnicas de array*. Tesis doctoral. Universidad de Granada. [CD].

Amoruso, A.; Crescentini, L.; De Luca, G.; Scarpa, R.; Abril, M.; Cirella, A.(1997): Underground earth strain and seismic radiation measurements with a laser interferometer and a dense small-aperture seismic array. *Annali di Geofisica*, XL, N.5, pp

Guirao, J.M.; Alguacil, G.; Gomez, F.; Vidal, F. & de Miguel, F. (1990): An automatic process for phase picking, location and magnitude estimation of local events. *Cahier du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Vol 1. pp 55-64* .

Havskov, J. & Ottemöller, 1999: Electronic Seismologist – SeisAn Earthquake Analysis Software. *Seismological Research Letters*, 70, 5.

Olivares, G. (1988): *Automatización de una central de registro de microterremotos para redes sísmicas locales*. Tesis doctoral. Universidad de Granada. 291pp.

Ottemöller, L and J. Havskov (1999). SEISNET: A general purpose virtual seismic network. *Seismological Research Letters*, 70, 522-528

Utheim, T, J. Havskov and Y. Natvik (2001). Seislog data acquisition system. *Seismological Research Letters*, 72, 77-79.

Vidal, F.; De Miguel, F.; Alguacil, G. y Guirao, J.M. (1981): Características de la secuencia sísmica granadina del año 1979. *IV Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica.* Instituto Geográfico Nacional, Vol. I, 423-438.

Vidal, F. y De Miguel, F. (1983): *Datos macrosísmicos de los terremotos sentidos en la Depresión de Granada durante el año 1979*. Publicaciones del Observatorio de Cartuja, report 3, 77 pp.

Willmore, P.L. editor, 1979: *Manual of seismic observatory practice*. Report SE-20, World Data Center A for Solid Earth Geophysics, US Dep. of Commerce, NOAA.