

# **INSTRUMENTACIÓN EN VOLCANOLOGÍA**

Ramón Ortiz  
Alicia García  
Mar Astiz

## PRESENTACIÓN

Este libro es el resultado de muchos años de trabajo en la instrumentación de volcanes activos, utilizando que muchas veces han tenido que ser diseñados y construidos en nuestros laboratorios para que cubrieran unas ciertas necesidades. Es también el resultado de muchas horas de discusión con especialistas en instrumentación geofísica, como Orlando Hernández, de la Casa de los Volcanes de Lanzarote; Servando de la Cruz de la Universidad nacional de México; Roberto Quass, del Centro Nacional de Prevención de Desastres de México; con Edoardo del Pezzo y Marcello Martini, del Observatorio Vesuviano, con Marino Martini de la Universidad de Florencia, con Michel van Ruymbeke y Andre Somerhausen del Observatoire Royal de Bélgica, Jerardo Alguacil, del Instituto Andaluz de Geofísica; Josep Vila del Institut d'Estudis Catalans; Joan Carles Olmedillas, del Institut Cartografic de Catalunya; Cai Weixin del Seismological Bureau de China, Hördor Halldórsson del Nordic Volcanological Institute, con Hugo Moreno, Gustavo Fuentealba, Paola Peña y demás miembros del Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur, Chile; con José Ramírez, Gabriel Reyes y sus colegas del Observatorio del Volcán Fuego de Colima, México y otros muchos amigos que dedican sus horas a tratar de obtener más y mejores datos de volcanes activos.

Parte importante de nuestra experiencia en instrumentación de volcanes activos la hemos podido adquirir gracias al desarrollo de importantes proyectos internacionales como el programa *European Laboratory Volcanoes*, en los volcanes Teide y Furnas y en el *Teide Decade Volcano* de la IAVCEI. A estos programas siguieron otros proyectos de menor envergadura, pero cuyo contenido era esencialmente tecnológico como el *AVMS: Automated Volcano Monitoring System*, dirigido a la automatización de los observatorios volcanológicos, el *TEKVOLC: Technique and method innovation in geophysical research, monitoring and early warning at active volcanoes*, encaminado a la aplicación de las nuevas tecnologías, el *EMEWS: European Mobile Early Warning System*, para la puesta a punto de un sistema de intervención inmediata y finalmente *SANARIS: Satellite network for Natural Risks monitoring*, para el desarrollo de sistemas de comunicación por satélite. Tampoco debemos olvidar el Programa Nacional Español de Investigación en la Antártida, que nos ha permitido a todos los autores evaluar la instrumentación en el estudio de la actividad volcánica en la Isla Decepción, uno de los pocos volcanes activos de la Antártida, donde las condiciones de operación de la instrumentación pueden considerarse extremas.

Estas notas están dirigidas a la formación de los jóvenes volcanólogos y forman parte del material que con fines educacionales se debe preparar en los volcanes laboratorio como contribución a la mitigación del riesgo volcánico. Esta documentación se utiliza como material didáctico del Curso Internacional de Volcanología que cada año se imparte en la Casa de los Volcanes de Lanzarote en el que la instrumentación aplicada al estudio de los volcanes ocupa una posición importante. El estudio instrumental de la actividad volcánica pasa necesariamente por disponer de una serie de instrumentos que nos aporten datos. La utilización correcta de estos datos requiere conocer cómo funcionan los instrumentos y hasta qué punto la información que podemos obtener con ellos refleja el fenómeno que estamos estudiando. Es muy frecuente que se consideren

los instrumentos como máquinas perfectas, que nos dicen aquello que en nuestra imaginación queremos oír. En general debemos considerar el instrumento, por bueno que éste sea, como una caja que nos da una pobre información del fenómeno que nos dice estar midiendo y que en cualquier momento nos puede fallar o dar una información falsa. El conocimiento de los principios básicos de la instrumentación y del proceso de datos nos puede evitar muchas desagradables sorpresas.

Estos apuntes recogen la experiencia de veinticinco años de trabajos en instrumentación aplicada al estudio de los volcanes. No pretenden ser un curso de electrónica, ni de geodesia ni de gases, sino una recopilación, necesariamente incompleta, de ideas y comentarios sobre los problemas actuales de la instrumentación en Volcanología. Se ha tratado de incluir el máximo posible de realizaciones prácticas, que esperamos permitan a muchos volcanólogos mejorar sus instrumentos con un costo moderado. En todos estos diseños hemos procurado seleccionar los componentes entre los más habituales del mercado, pero a pesar de ello, es posible que alguno de los componentes utilizados no sea fácilmente localizable. En tal caso es sencillo sustituirlo por otro de características más o menos parecidas. En muchos casos los diseños son fácilmente mejorables, aunque ello pueda suponer aumentar la complejidad del diseño o la utilización de componentes más sofisticados y no siempre de fácil adquisición. Por otro lado, algunos diseños tienen ya cuatro o cinco años desde que fueron concebidos, lógicamente han quedado obsoletos y alguno de sus componentes puede estar ya descatalogado. Especialmente en cuanto a sistemas digitales recomendamos casi exclusivamente trabajar con los nuevos conversores de 16 bits y superiores, con tecnología delta sigma y que puede llegar a resoluciones de 24 bits. Todo libro contiene errores, por ello es MUY IMPORTANTE comprobar exhaustivamente los diseños y programas antes de proceder a su realización, en caso de duda... consultar.

Finalmente, esta obra no habría visto la luz sin el apoyo de la Casa de los Volcanes de Lanzarote y de Joaquín Naveran su director, del Cabildo de Lanzarote, de ...

Ramón Ortiz, Alicia García y Mar Astiz

# INDICE

## PRESENTACIÓN

<b>INSTRUMENTACIÓN EN VOLCANOLOGÍA. INTRODUCCIÓN</b>	1
Qué es un instrumento	1
Sistemas automáticos	4
Primer nivel de automatización	6
Segundo nivel de automatización	7
Tercer nivel de automatización	8
Cuarto nivel de automatización	8
Red de comunicaciones	10
Qué es una unidad de adquisición de datos	12
Computadores personales como sistemas de adquisición de datos	14

<b>REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA</b>	17
Qué nos dice un instrumento	17
Medidas multiparamétricas	18
Sistemas analógicos y digitales	19
Muestreo y retención	20
Digitalización	21
Frecuencia de muestreo	23
Representación matemática	23
Filtros	27
Conversión analógico digital	28
Determinación de la respuesta en frecuencia	28
Aritmética binaria	29
Suma de números binarios	31
Números positivos y negativos	31
Multiplicación	32
Tipos de datos	33
Filtros digitales	35
Filtros FIR	36
Filtros IIR	42
Consideraciones sobre filtrado	43

<b>INTRODUCCIÓN A LA ELECTRÓNICA ANALÓGICA</b>	45
El amplificador operacional. Principios básicos	45
Función de transferencia de un circuito con realimentación negativa	46
Configuraciones básicas	47
Circuito con impedancia de entrada negativa	50

Filtros. Introducción	52
Filtros pasivos	53
Filtros activos	55
Filtros de orden elevado	57
Filtros de Butterworth	58
Diseño de un filtro anti-aliasing	60
Resolución de un conversor	61
Diseño de un filtro anti-aliasing para un conversor delta sigma	63
<b>SISTEMAS DE CONVERSIÓN ANALÓGICA DIGITAL</b>	67
Introducción	67
Conversión digital analógico	67
Errores de digitalización	69
Conversión analógico digital (ADC)	71
Conversores de alta resolución	75
Conversores analógico digital de alta resolución y aplicación general	76
Conversores de 12 bits.	83
Fuentes de alimentación	85
Software para el control de conversores analógico digital	86
Sistemas multiparamétricos. Formato de los datos	87
Procesado de los datos	88
Sistemas operativos	90
Sistemas de microcontrolador	90
Transmisión en serie	91
Software para computadores PC	98
Gestión del puerto serie	98
Recomendaciones	102
<b>MEDIDA DE GASES VOLCÁNICOS</b>	131
Introducción	131
Técnicas para el análisis de gases	134
Muestreo y análisis de gases volcánicos	137
Análisis de gases. Dispositivos de muestreo	138
Análisis de gases ácidos. Proceso	140
Determinaciones analíticas	140
Dispositivo electrónico	149
Determinación del CO <sub>2</sub> mediante detectores de infrarrojo	151
Métodos de la sonda y la cámara de acumulación	159
Sensores de estado sólido para la detección de gases volcánicos	161
Otros sensores	163
Medida del Radón	164
<b>MEDIDA DE DEFORMACIONES</b>	167
Métodos geodésicos. Introducción	167

Medida de la inclinación	167
Red geodésica	171
Redes GPS	172
Nivelación de lagos	175
Marcas y referencias	176
Sistemas automáticos	180
Medida electrónica de pequeñas deformaciones	180
Sensores de desplazamiento	182
Realización de un inclinómetro de péndulo vertical	194
Inclinómetro de burbuja	196
Extensómetro	197
Clinómetro de agua	201
Mareógrafo	203
Sensor para grandes desplazamientos	204

<b>OTRAS TÉCNICAS PARA EL SEGUIMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA</b>	205
Medida de temperaturas	205
Radiómetro	208
Pirómetro óptico	209
Termómetros mecánicos	210
Termómetros eléctricos	211
Vigilancia visual de volcanes	219
Métodos electromagnéticos	222
Detección de lahares	229
Micro-barógrafo	232

<b>GEÓFONOS</b>	235
Introducción	235
El geófono electromagnético	236
Geófonos capacitivos	238
Circuito equivalente a un geófono electromagnético	239
Ampliación de la respuesta de un geófono electromagnético	242
Otras consideraciones	250

<b>REGISTRO SÍSMICO ANALÓGICO</b>	251
Introducción	251
Registrador sísmico de tambor	252
Sistemas de telemetría sísmica analógica	261
Estación sísmica con telemetría analógica	262
Red sísmica analógica con registro digital centralizado	268
Realización practica	271
Otras posibilidades: sistemas híbridos	272

<b>SISTEMA DE REGISTRO SÍSMICO DIGITAL</b>	273
Introducción	273
Características de la señal sísmica en áreas volcánicas activas	274
Estación sísmica digital autónoma	277
Sistema de registro sísmico con telemetría	278
Software para el registro de la actividad sísmica	282
Implementación e Interfase de usuario	289
<b>TÉCNICAS DE ANTENA SÍSMICA EN VOLCANOLOGÍA</b>	293
Introducción	293
Técnicas de antenas sísmicas	294
Software para la operación de la antena	300
Instalación y operación	301
Análisis de los registros	302
<b>CENTRO DE ATENCIÓN PERMANENTE PARA LA GESTIÓN DE UNA CRISIS VOLCÁNICA</b>	305
Introducción	305
Centro de Atención Permanente	306
Sistema de computación	307
Comunicaciones entre aplicaciones	310
Protocolos de comunicación	312
Información de acceso público durante una crisis	312
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	315
<b>DIRECCIONES ÚTILES EN INTERNET</b>	325
<b>APENDICES</b>	327
Prácticas de instrumentación	327
Mástiles y soportes	331
Casetas para instrumentos	333
Amplificación anómala: efecto suelo	335
Mini bomba para pequeños flujos de gas	337
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	313
<b>DIRECCIONES ÚTILES EN INTERNET</b>	323
<b>APENDICES</b>	
Prácticas de instrumentación	325
Mástiles y soportes	329
Casetas para instrumentos	331
Amplificación anómala: efecto suelo	333

# INSTRUMENTACIÓN EN VOLCANOLOGÍA. INTRODUCCIÓN

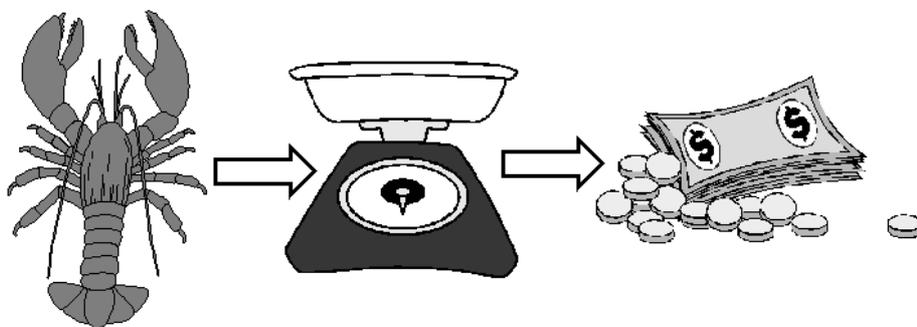
## Qué es un instrumento

Un instrumento es una interfase que nos permite relacionarnos con el mundo físico y nos permite extraer información del mismo, aunque algunos instrumentos pueden también actuar sobre el medio. La información obtenida siempre representa un aspecto parcial del fenómeno que se está desarrollando y, en algunas ocasiones, pueden modificarlo considerablemente.



**Figura 1-1.** En algunos casos es tal la simplificación que debemos hacer del problema que nos conduce al llamado *caballo esférico*

En general, los instrumentos en Geofísica se limitan a aportarnos datos sobre los fenómenos que tienen lugar aunque todavía no permiten actuar directamente sobre los mismos. Por ello, en adelante sólo consideraremos este tipo de instrumentación.



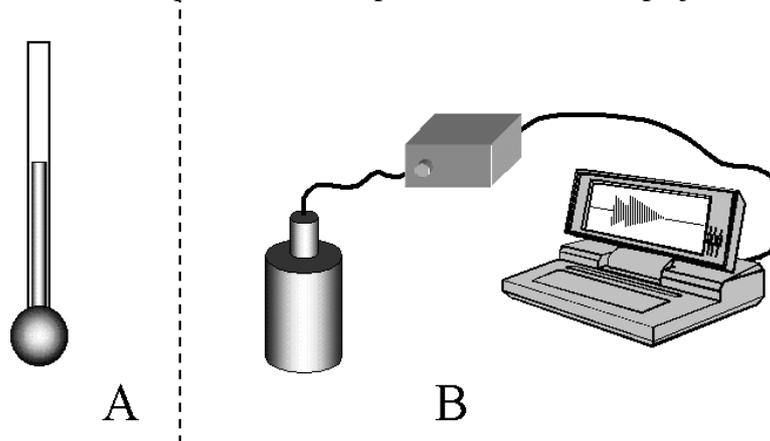
**Figura 1-2.** Aunque otras ciencias disponen de instrumentos que permiten actuar sobre el mundo físico, modificándolo, en Volcanología debemos contentarnos con obtener información del fenómeno.

Algunos instrumentos no precisan energía para poder operar ya que la obtienen del mismo fenómeno a medir. Otros, especialmente cuando se trata de sistemas complejos, requieren una fuente de energía auxiliar, resuelta generalmente con unas baterías. Es precisamente esta necesidad energética la que mayores problemas acarrea en la operatividad del instrumento, especialmente en el caso de la Volcanología, donde es habitual tener que operar lejos de un centro urbano y donde los sistemas auxiliares de generación de energía (como paneles solares o aerogeneradores) no siempre funcionan satisfactoriamente. Cuando un aparato se deja desatendido por un cierto tiempo, las baterías pueden descargarse, la humedad puede estar afectando a la electrónica, etc. Cuando ocurra el evento tanto tiempo esperado, puede suceder que la mayoría de los

instrumentos no funcionen. Entre los lemas que no se deben olvidar jamás están los siguientes:

*Un aparato es tan bueno como la alimentación que recibe.  
Si quieres registrar, aparato no abandonarás.*

Al considerar un instrumento cualquiera siempre se debe tener presente cómo se establece la relación entre el fenómeno físico y la información que el instrumento nos proporciona. En un instrumento existen siempre dos partes: el sensor o captador y la salida de información. En muchas ocasiones, se le incorpora una tercera parte encargada de manipular la señal dada por el sensor para adaptarla a la salida de información disponible. No es extraño que esta tercera parte sea la más compleja del sistema.



**Figura 1-3.** Todo instrumento posee al menos dos partes: el sensor o captador y la salida de información, por ejemplo (A) un termómetro de mercurio. En muchos casos se debe incluir una parte intermedia encargada de procesar la información para facilitar su comprensión, como es el caso (B) de una estación sísmica.

Cuando se precisa un instrumento para realizar el estudio de un determinado fenómeno debe empezarse por definir una serie de características globales del sistema que dependen de las propiedades del fenómeno a estudiar, del lugar de emplazamiento, de las relaciones con el observador y de las disponibilidades de medios técnicos y económicos. En general, no es posible optimizar simultáneamente todas ellas, siendo necesario configurar el instrumento para cada aplicación concreta.

<b>Definición instrumento</b>		
Modo operación	directa	automática
Tipo de información	analógica	digital
Situación	en el sitio	con telemetría
Diálogo	unidireccional	bidireccional
Forma de medir	pasivo	activo
Efecto sobre el medio	perturba	no perturba
Efecto del medio	resiste	no resiste
Tipo de medida	puntual	continua
Tiempo	absoluto	relativo
	real	diferido
Relación exterior	cerrado	abierto

El modo de operación puede ser manual o automático y en ese segundo caso puede requerir la presencia más o menos frecuente de un operador. En general, esta opción dependerá del número de operadores disponibles y de la estructura socioeconómica del país en el que se instale el instrumento (lo que puede hacer un hombre que no lo haga una máquina o viceversa). Los instrumentos analógicos suelen ser más simples, más económicos y de fácil mantenimiento. Además, su lectura es más intuitiva por operadores no cualificados. Sin embargo, la instrumentación digital, además de una mayor resolución, permite automatizar al menos parcialmente, el proceso de reducción, interpretación y archivo de datos. En muchas ocasiones deberemos acudir a sistemas híbridos, donde una parte importante del sistema sigue siendo analógica y sólo la fase final es digital. La mayor parte de las redes sísmicas digitales son realmente redes analógicas con registro digital.

La relación espacial existente entre dónde se produce el fenómeno y el emplazamiento de las partes sensora y de recogida de la información introduce los conceptos de registro en el sitio y de telemetría. No hay que olvidar que telemetría significa medida a distancia y se aplica cuando el fenómeno a medir y el sensor, están separados (por ejemplo un pirómetro óptico) y también, si el sensor se encuentra donde se produce el fenómeno y sólo es la información captada la que se transmite a distancia. El diálogo entre el operador y el instrumento o entre las distintas partes que lo constituyen puede ser unidireccional (un clásico termómetro de mercurio) o bidireccional (un simple cambio de escala). Esta segunda posibilidad suele complicar tremendamente la operatividad del instrumento, los sistemas de telemetría y la formación de los operadores.

Hay medidas que se realizan en forma pasiva (un voltaje, un terremoto), mientras que otras exigen realizar una operación sobre el medio. Así, la medida de una resistencia exige hacer pasar por el medio una corriente y la determinación de una velocidad sísmica se hace mediante una explosión controlada. En ocasiones, la realización de una medida modifica el propio fenómeno a medir (la medida de la resistencia a la rotura de un material exige romper la muestra). La agresión del medio (incluido el vandalismo) es otro factor importante a considerar. En ocasiones puede ser mucho más costosa la protección del instrumento que el propio instrumento.

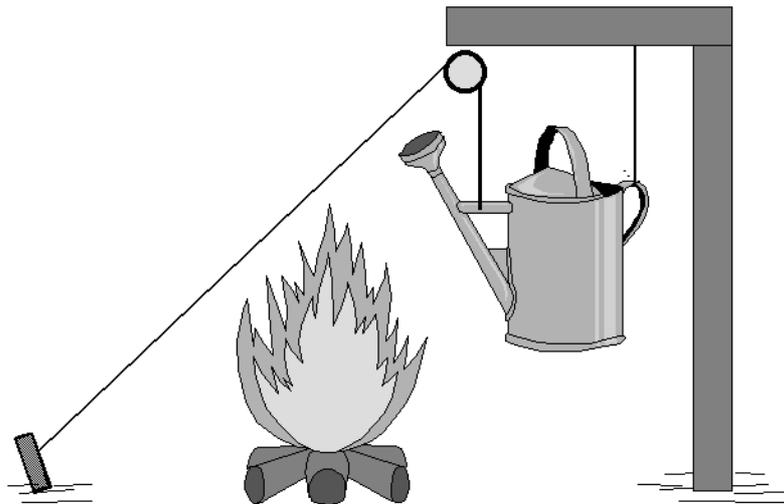
En muchos casos es suficiente con tomar una medida puntual (espacial y/o temporal), en otros, las medidas deben repetirse. La frecuencia de repetición de la medida es un factor importante ya que los datos hay que estudiarlos y archivarlos y es imposible trabajar con un volumen excesivo de datos (además del coste que supone). Un tipo de medidas deben conocerse en tiempo real, otras no importa que estén diferidas; dos instrumentos pueden requerir una sincronización temporal, otros pueden operar con escalas temporales relativas. Hay que tener presente que una medida en tiempo real siempre está retardada, aunque sea sólo la constante de tiempo del sistema. Debe tenerse presente que la sincronización de sistemas no es un problema trivial.

Un sistema abierto es aquél que se relaciona con el exterior, aunque sea sólo a través de una antena o de una batería de alimentación. Un instrumento totalmente cerrado es el que mejor se puede proteger contra la agresión del medio y del vandalismo, pero ello supone importantes limitaciones en cuanto a energía disponible, imposibilidad utilizar telemetría (las antenas son la causa de la mayor parte de las averías que sufren las

estaciones de registro sísmico), etc. Muchos de los instrumentos utilizados en Oceanografía son sistemas cerrados.

### Sistemas automáticos

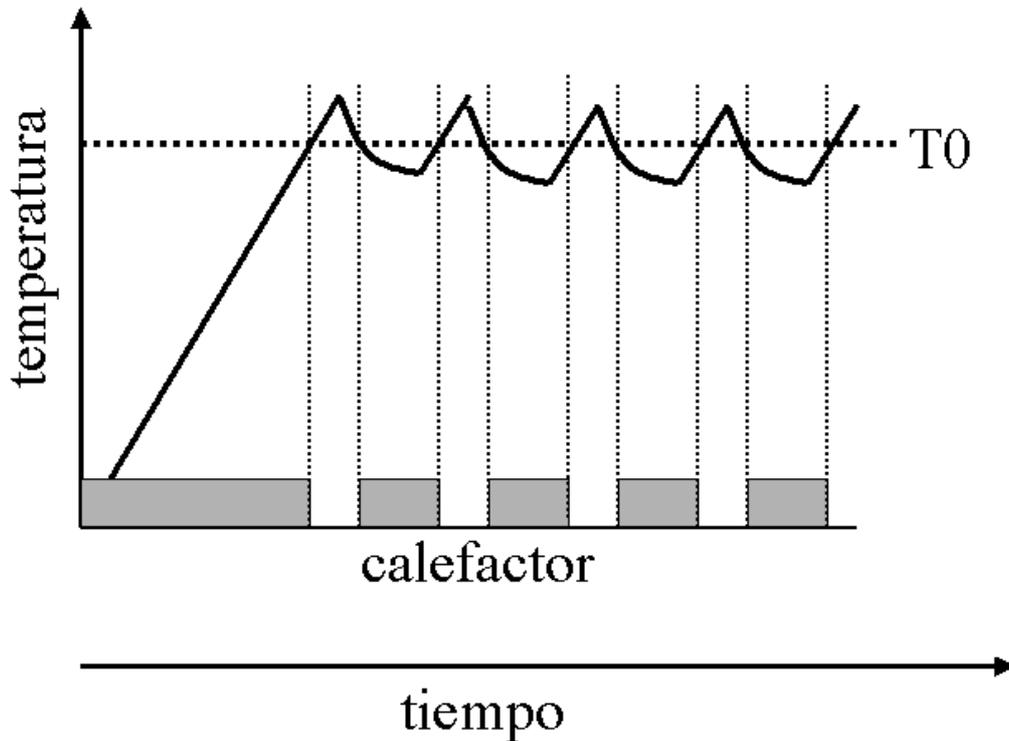
Un sistema automático es aquel que realiza alguna operación por sí sólo. El concepto es muy amplio y se aplica desde mecanismos muy sencillos a complejos sistemas que son capaces de tomar decisiones importantes por si solos. En un sistema automático elemental siempre se pueden distinguir tres partes: elementos sensores, elementos de proceso y elementos de actuación.



**Figura 1-9.** Este sistema permite apagar una hoguera automáticamente y está formado por un sensor (la cuerda), un procesador (la polea) y un actuador (la regadera).

El diseño de un sistema de proceso automático es relativamente sencillo cuando se requiere tratar la información procedente de un sólo tipo de sensor, en donde la actuación que sigue a una variación de la señal dada por el sensor es:

- Todo o Nada. Es decir se activa o desactiva un mecanismo Los termostatos mas sencillos son de este tipo: el calefactor se desconecta una vez alcanzada la temperatura. Estos sistemas presentan fuertes oscilaciones.
- Proporcional a la señal de entrada (proporcional). La actuación depende de la entrada, alcanzan rápidamente las condiciones de equilibrio, aunque también pueden presentar fuertes oscilaciones.
- Proporcional a la variación de la entrada (derivada). La actuación es proporcional al error, evitan las oscilaciones, aunque puede tardar mucho tiempo en alcanzar las condiciones de equilibrio.
- Proporcional al valor medio de la señal de entrada (integral). Este sistema mantiene el valor medio de la señal, aunque permite variaciones rápidas. Como ejemplo puede servir el ajuste automático del cero de un amplificador para registro sísmico de corto periodo.
- Sistemas complejos: la actuación se controla mediante una función matemática, más o menos complicada, de la señal de entrada. De esta forma es posible adaptar la respuesta a distintas condiciones de operación.



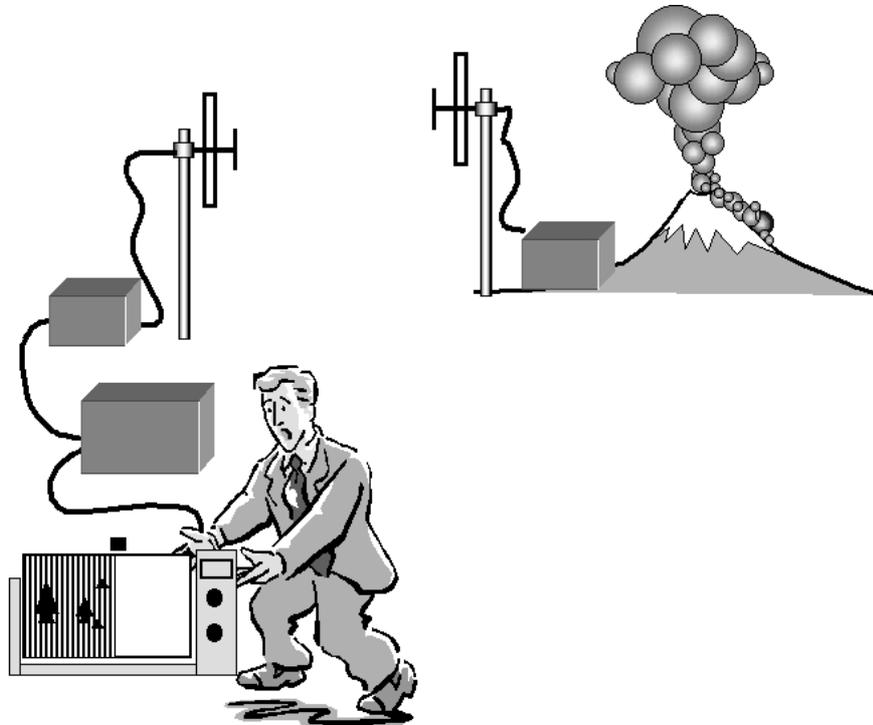
**Figura 1-10.** Un controlador de temperatura funciona en modo todo o nada, conectando un calefactor cuando la temperatura es inferior a la deseada ( $T_0$ ) y desconectándolo en cuanto se alcanza ésta. La temperatura del sistema presenta una oscilación cuya amplitud depende de las características térmicas del sistema y de la potencia del calefactor.

El primer caso es el más sencillo, la actuación se inicia al sobrepasar la entrada un determinado nivel (alarma). Los siguientes tres casos responden a un sistema de control lineal, en donde cada uno de ellos presenta sus ventajas e inconvenientes, debiéndose considerar en cada caso cual de los sistemas es el más adecuado. En ocasiones, se acude a sistemas mixtos. El último caso se ha desarrollado últimamente como consecuencia de la posibilidad de incorporación sencilla de computadores al sistema de control. En el diseño de un sistema automático se considera la velocidad de respuesta, la posible aparición de oscilaciones y la amplitud máxima que puede ser aceptable, además del coste del sistema y su fiabilidad.

Sin embargo, cuando actualmente se habla de un sistema de proceso automático, nos referiremos a un sistema con múltiples variables de entrada a partir de las cuales es necesario extraer una información o realizar una actuación. En tal caso el análisis del sistema no es sencillo, debiéndose adoptar estructuras de decisión que responden a lo que se denomina *Inteligencia Artificial*. Estos sistemas tienen la posibilidad de interactuar con una base de datos, realizando búsquedas de situaciones análogas que permitan resolver cada situación y de incorporar a la base de datos las nuevas situaciones que se vayan presentando. Sin embargo, a pesar de los grandes progresos que se vienen haciendo en inteligencia artificial, todavía la mayor parte de sistemas de proceso automático responden a un planteamiento determinista, utilizando una aproximación lineal y algoritmos tradicionales codificados mediante los lenguajes de programación habituales como FORTRAN, C y otros.

Muchos sistemas automáticos responden a estructuras paralelas en las que cada una de ellas procesa la información de un sensor o grupo de sensores similares, realizando

todas aquellas operaciones que son de rutina, con un procesador final que presenta un extracto de todas las informaciones parciales. Estos sistemas permiten un considerable ahorro en tiempo y personal, pero requieren la intervención de un operador que examine los resultados finales y adopte la resolución precisa.

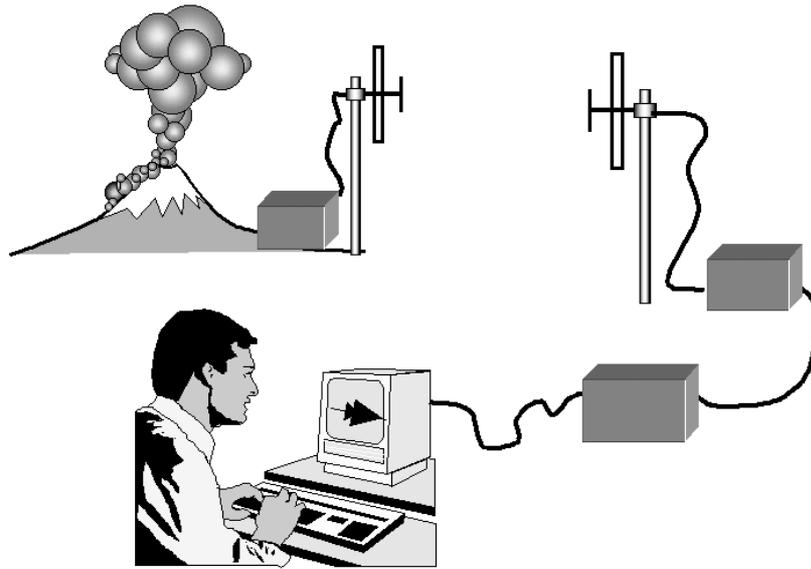


**Figura 1-11.** Una red sísmica analógica es un sistema con un primer nivel de automatización.

Como guía de esta problemática nos referiremos como ejemplo a la automatización de un observatorio volcanológico. En este caso debemos tener presente la siguiente problemática: múltiples sensores (sísmicos, gases, temperaturas, magnetismo, clinómetros, gravímetros, resistivímetros, etc.), dispersos en una extensa área, generalmente de difícil acceso y cuya información no siempre es posible de correlacionar con el estado y evolución de la actividad volcánica. El observatorio volcanológico automático ideal sería aquel que fuera capaz de procesar toda la información disponible y elaborar un informe sobre el estado del volcán, estableciendo automáticamente los correspondientes niveles de alarma. Una primera clasificación se puede establecer atendiendo simplemente al nivel de sofisticación del sistema.

### **Primer nivel de automatización**

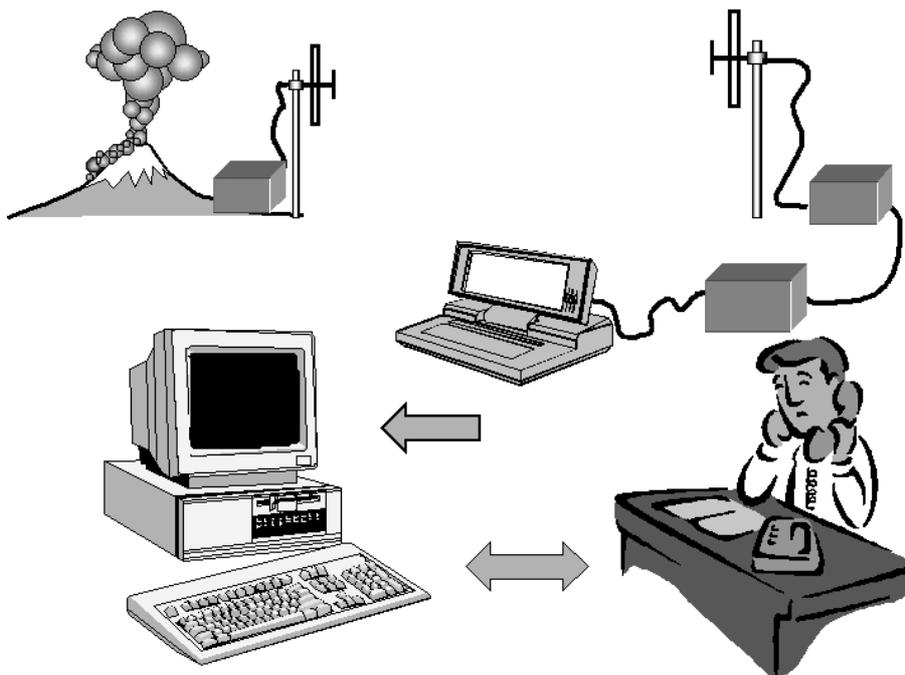
El sistema se limita a la recogida analógica de los datos aportados por una serie de sensores, que pueden estar situados más o menos lejos del sistema de registro. La evaluación de los distintos datos las realiza visualmente un operador más o menos especializado. No existe ninguna posibilidad de procesamiento de las distintas señales. Actualmente muchos de estos sistemas se han digitalizado, aunque persiste el sistema de evaluación visual de los datos obtenidos.



**Figura 1-12.** Una red de registro sísmico digital es un sistema con un segundo nivel de automatización

### Segundo nivel de automatización

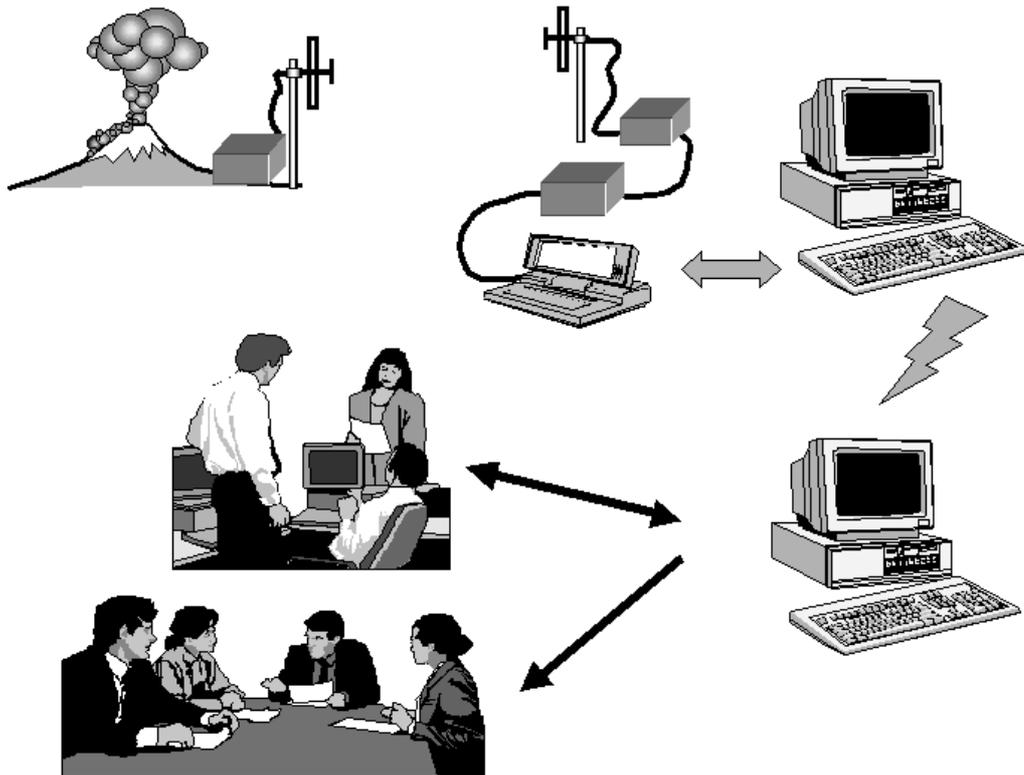
El sistema recibe una serie de datos que se registran digitalmente. Existe una pequeña capacidad de procesado de la información, la cual puede retransmitirse en forma condensada o gestionar algún tipo de seña o alarma. Como ejemplo sirve la gestión de una estación sísmica digital, que es capaz de distinguir un movimiento sísmico del ruido, y evaluar su magnitud y en muchos casos proceder a una localización automática del evento.



**Figura 1-13.** Una red sísmica con detección y clasificación automática de eventos es un ejemplo de tercer nivel de automatización.

### Tercer nivel de automatización

Al igual que en el nivel anterior, el sistema recibe una serie de datos que se registran digitalmente. La capacidad de cálculo es elevada y el sistema puede interpretar conjuntamente todos los datos, mostrando en todo momento la evolución del sistema. Sin embargo, el nivel de decisión sigue estando en manos del equipo de científicos encargados del observatorio.

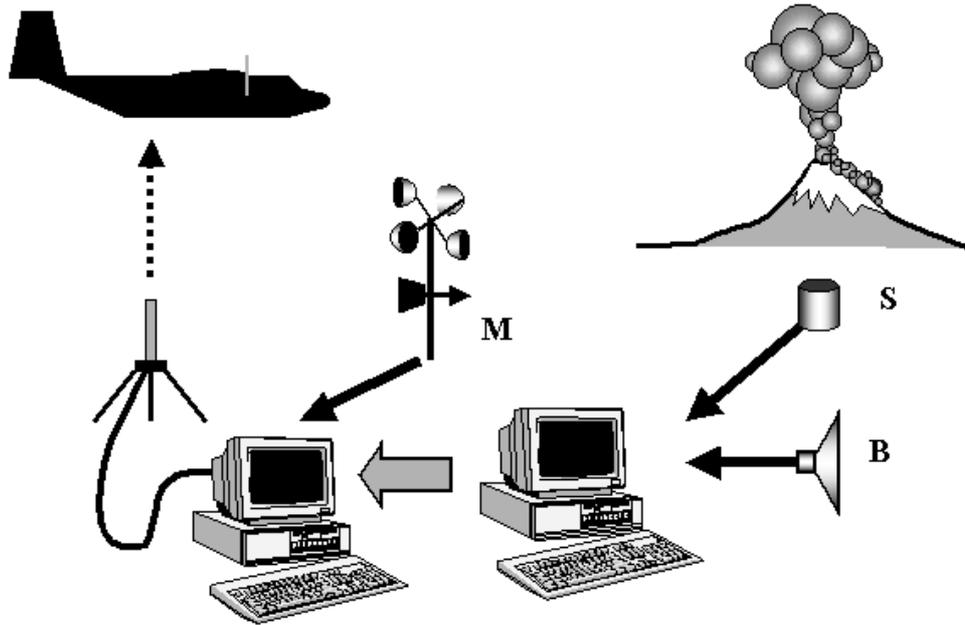


**Figura 1-14.** Sistema de registro sísmico con un cuarto nivel de automatización. Salvo en casos muy particulares y de forma limitada, hoy todavía no es posible implementar un sistema de estas características.

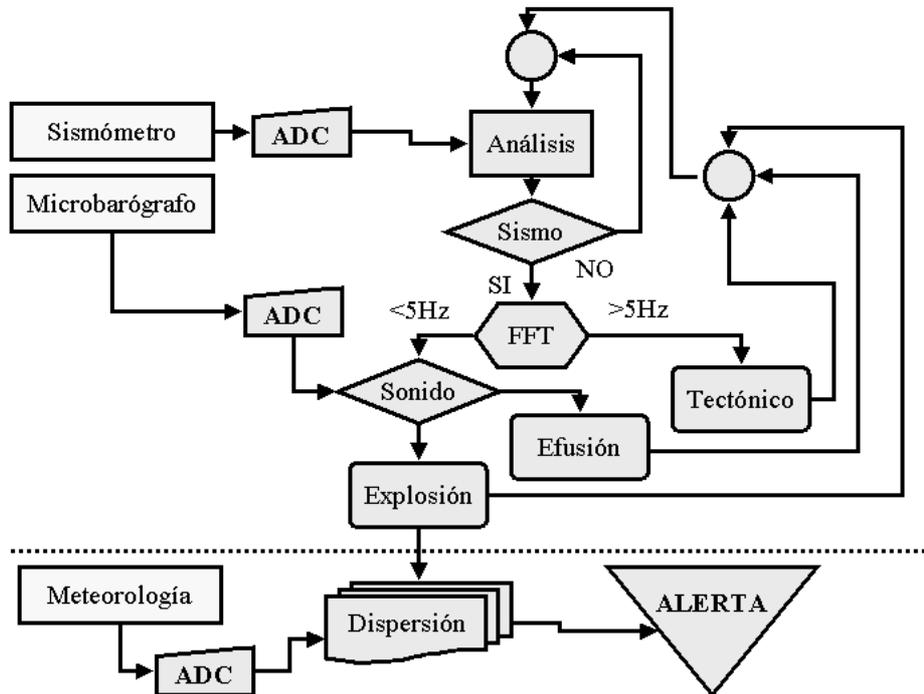
### Cuarto nivel de automatización

En este nivel el sistema, toma las decisiones oportunas en cada momento. Estableciendo los distintos niveles de alarma y comunicándose directamente con las autoridades y responsables de la protección civil. En estos momentos, los avances en inteligencia artificial no permiten todavía construir un equipo de estas características.

Actualmente, la mayoría de los sistemas de vigilancia de volcanes no pasan de los dos primeros niveles. Se están realizando muchas aplicaciones concretas tendentes a transformar los equipos existentes de primer nivel al segundo y en algunos casos a concentrar la información en lo que constituiría las bases del tercer nivel. Existen aplicaciones limitadas, como puede ser transmitir una alerta automática a aviones cuyo pasillo aéreo pasa cerca de un volcán explosivo. Es necesario que en ese volcán se produzcan las explosiones con suficiente frecuencia para poder desarrollar los algoritmos de reconocimiento de los precursores de las explosiones.

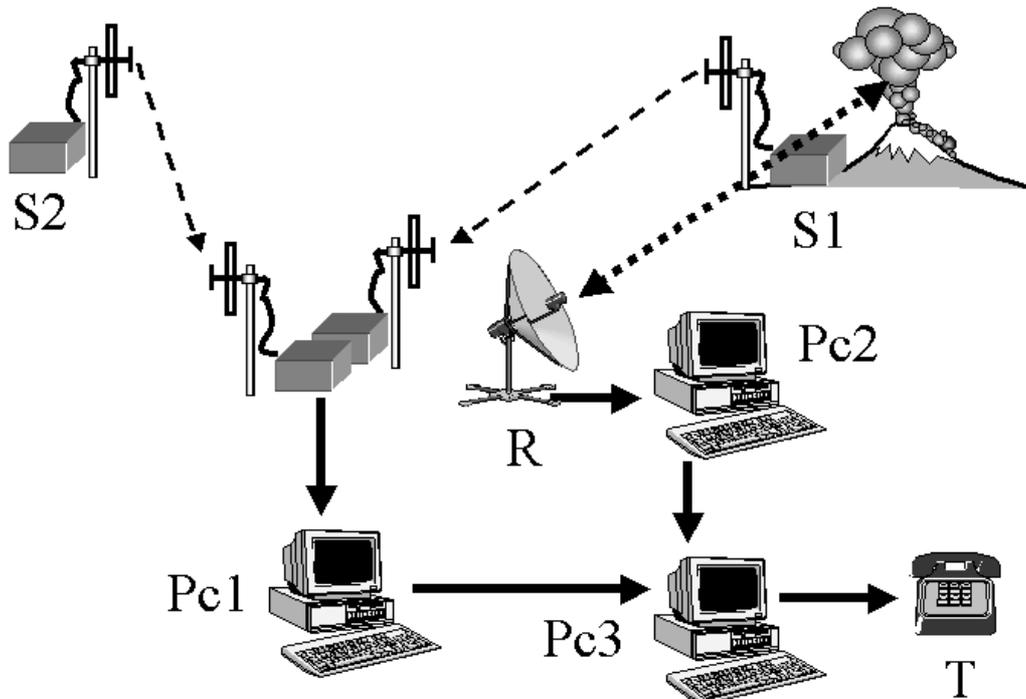


**Figura 1-15.** Sistema automático desarrollado por la Japan Air Lines (JAL) para avisar de la presencia de cenizas volcánicas ejectadas por el volcán Sakurajima. El computador identifica las explosiones del volcán en base a la correlación de la señal sísmica (S) y de la onda de presión generada (B). Estos datos se combinan con la información del viento (M) y, si procede, se emite automáticamente una señal de aviso.



**Figura 1-16.** Diagrama lógico del sistema de alerta automática para aeronaves: El sistema analiza continuamente la señal sísmica, buscando la detección de un evento. Cuando esto ocurre se analiza el espectro de la señal. Si predominan las bajas frecuencias se trata de una explosión o de una posible efusión de lavas. La coincidencia con una onda de presión (infrasonido) permite discriminar la explosión. En este momento se pasa la información al segundo computador que analiza la dispersión de las cenizas y emite el mensaje de alerta.

El establecimiento del cuarto nivel, el observatorio automático, precisa todavía de un gran avance en las técnicas de la inteligencia artificial, pero requiere un mayor conocimiento del fenómeno volcánico en general y especialmente del inicio de la erupción. Sin estos conocimientos, los sistemas automáticos no pasan de servir sólo para presentar de la forma más atractiva posible los datos recogidos por los distintos sensores, pero que poco nos aportan a la hora de realizar una adecuada predicción del fenómeno.

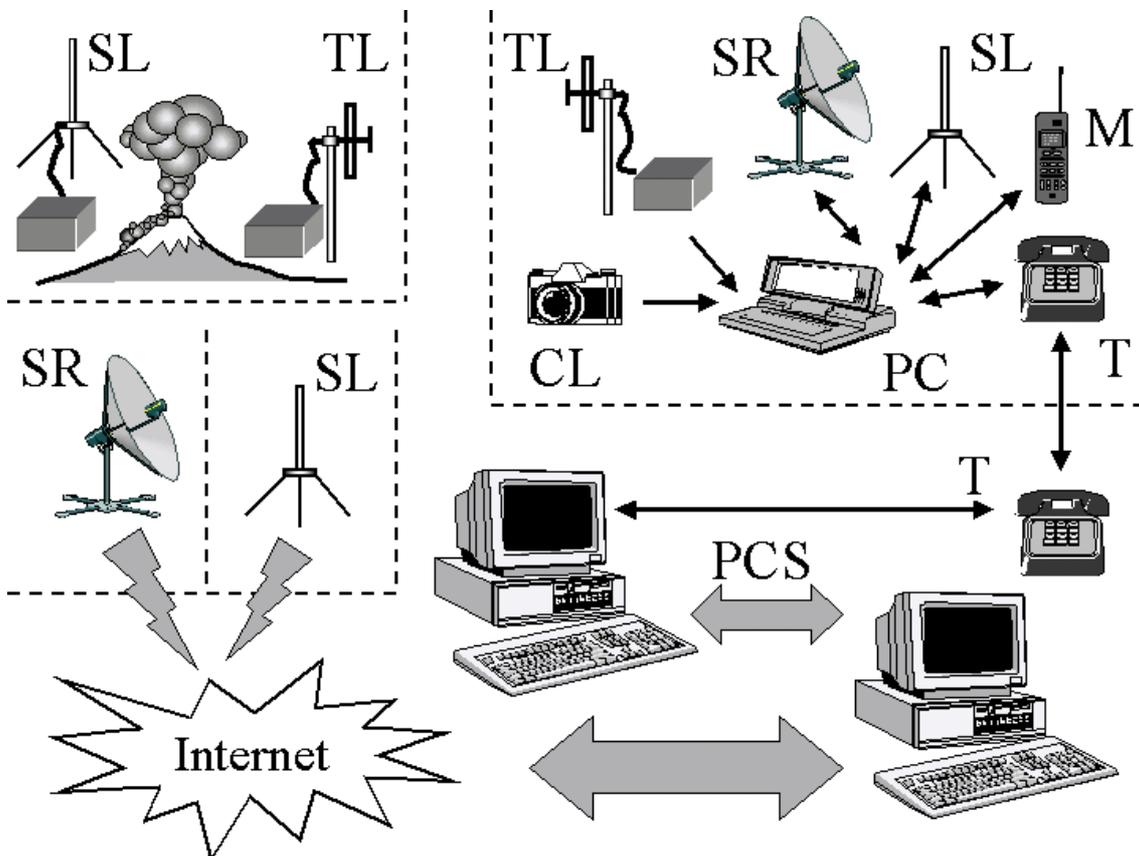


**Figura 1-16.** Sistema de alerta automático desarrollado por el CENAPRED para la indicación de presencia de cenizas en el volcán Popocatepetl (México). La comparación entre los registros sísmicos de las estaciones próximas al volcán (S1) y lejanas (S2) permite identificar la ocurrencia de un evento bajo el volcán, si pocos segundos después el radar R recibe ecos sobre la cumbre del volcán indica que se está produciendo una emisión de cenizas y se procede a transmitir la alerta (T). De este modo el sistema puede operar aunque la zona esté nublada. La mayor complejidad del sistema se debe a que la actividad de este volcán es mucho mayor que en el caso del Sakurajima y la vigilancia hay que hacerla desde mucho más lejos.

### Red de comunicaciones

La realización de estos sistemas de vigilancia automática de volcanes, incluso limitándonos a los primeros niveles de automatización, exige disponer de un adecuado sistema de comunicaciones entre los sensores, los sistemas de adquisición de datos y los distintos niveles de procesado de la información. La fiabilidad de todo el sistema es uno de los puntos más críticos, pues puede ocurrir que en el momento de la crisis todo el sistema quede inoperante por fallo en las comunicaciones. En general, no es posible con las tecnologías actuales garantizar la seguridad de las comunicaciones en caso de una erupción, pero si es posible que funcionen con un alto grado de fiabilidad en los momentos anteriores, que es cuando es más importante la toma de decisiones referentes al riesgo volcánico.

Las técnicas de comunicación por satélite son ya abordables para comunicaciones de corta duración, igualmente las redes de teléfonos inalámbricos cubren ya gran parte del territorio, y es posible diseñar enlaces basados en utilizar esta tecnología que permiten enlaces telefónicos incluso a pie del volcán o sobre el mismo cráter.



**Figura 1-17.** Una red instrumental para el seguimiento de la actividad volcánica utiliza diferentes tecnologías para la transmisión de la información desde las proximidades del volcán a los centros de proceso y análisis de datos. TL telemetría radio, SR enlace satélite rápido, SL enlace satélite lento, T teléfono, M telefonía móvil, CL cámara. El acceso a gran distancia se realiza utilizando el soporte de Internet. En distintos nodos de la red se incluyen los computadores necesarios para el control del tráfico y empaquetado de los datos.

Pequeños enlaces de VHF o UHF permiten cubrir con seguridad los últimos tramos y requieren muy poca energía para su operación, especialmente si no transmiten en continuo. Los sistemas basados en conmutación de frecuencia (*spread spectrum*) son otra posibilidad, existiendo en el mercado muchos productos de este tipo para comunicación entre computadores a precios abordables. Sin embargo, la proliferación del mundo de las comunicaciones hace que cada vez sea más difícil conseguir asignación de frecuencias y que después estas sean respetadas. Además, muchas soluciones no son aplicables por la legislación existente en algunos países. La tendencia actual es permitir el uso libre de algunas bandas con la única limitación de la potencia en antena disponible

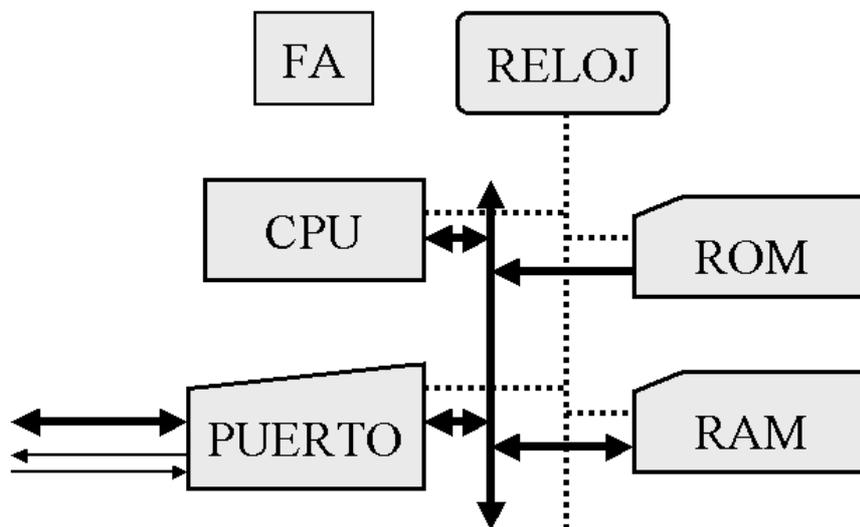
Es importante evitar que se formen cuellos de botella en el sistema de enlaces, un fallo en un repetidor puede dejar inoperante todo el sistema de vigilancia por mucho tiempo. Para evitar esto es necesario establecer algunos canales redundantes y diversificar las líneas telemétricas, aunque ello supone un encarecimiento de los costes del sistema.

Cuestiones a definir:

- Volumen de datos a transmitir (máximo y mínimo aceptable)
- Enlaces unidireccionales o bidireccionales
- Enlaces continuos o interrumpidos
- Red telefónica conmutada o líneas dedicadas
- Satélites, órbita polar o geoestacionaria
- Coste de operación y mantenimiento
- Fiabilidad del sistema

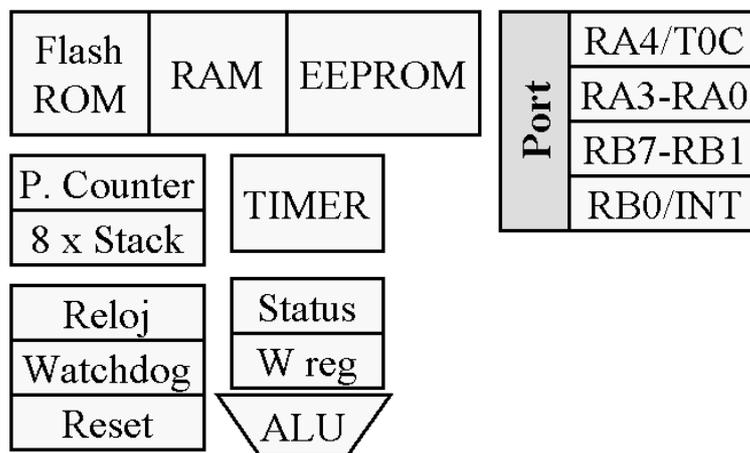
### Qué es una unidad de adquisición de datos

La salida de la información dada por un instrumento generalmente se debe almacenar para su uso posterior. Un sistema que realice esta labor es lo que se conoce actualmente como unidad de adquisición de datos. Toda unidad de adquisición de datos precisa de un soporte donde poder almacenar los datos, de un sistema de entrada y salida de los mismos y de un módulo de control. El sistema manual clásico de adquirir datos posee también estos elementos: un operador (control) realiza las medidas (entrada) que después apunta sobre un papel (almacén) y que algún día alguien leerá (salida). La operación del sistema exige la realización de un programa de operación, donde se recogen las instrucciones de como medir, cuando medir y como deben apuntarse los datos, así como los formatos que deben utilizarse. En algunos casos este programa es fijo y se ejecuta durante años, como ejemplo se pueden citar las estaciones meteorológicas de hace no demasiados años. En otros casos es necesario modificar el procedimiento sobre la base de los niveles de actividad registrados. La facilidad de programación del sistema es uno de los factores más importantes del diseño.



**Figura 1-18.** Estructura básica de un microprocesador: está formado por una unidad central de proceso CPU, unos puertos de entrada y salida y unas memorias para programas (ROM) y datos (RAM) controlado por un reloj. También dispone de una fuente de alimentación. Hay un conjunto de líneas para el tráfico de datos (trazo continuo) y otro para las señales de control de los distintos circuitos (trazo discontinuo).

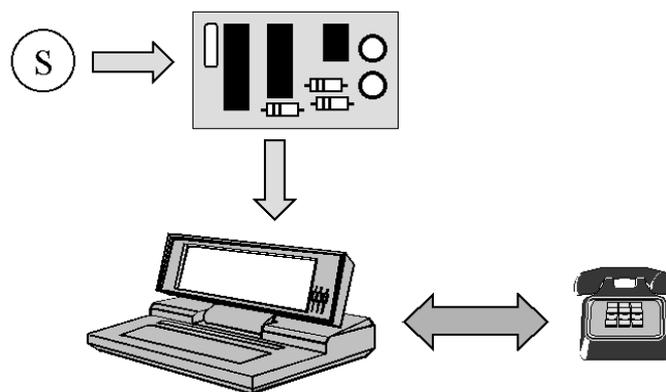
En general, una unidad de adquisición de datos no es posible considerarla aislada tanto del fenómeno a medir como del sistema posterior de análisis de los datos obtenidos. En realidad, la unidad de adquisición de datos lo único que hace es almacenar durante un tiempo más o menos largo los datos obtenidos hasta que éstos son requeridos para su análisis en la unidad de explotación. En algunos casos la unidad de adquisición de datos está provista de una cierta capacidad de proceso y puede ejecutar algunos pequeños cálculos. Es importante también considerar cual es el método mediante el cual los datos recogidos en la unidad de adquisición se transfieren al sistema de explotación. Algunas veces, este proceso se realiza con enlaces telemétricos, pero es todavía muy frecuente que sea mediante la intervención de un operador y por un correo tradicional la forma como estos datos lleguen, bastantes días más tarde, al centro de explotación. El intervalo entre visitas a la unidad de adquisición de datos es un factor a tener muy en cuenta a la hora de realizar el diseño. Otro factor importante es que habitualmente este tipo de unidades opera en forma inatendida en un ambiente hostil. La resistencia a estas condiciones adversas y la protección contra el vandalismo son dos factores que encarecen sobremanera el sistema.



**Figura 1-19.** Un microcontrolador constituye el núcleo de un sistema de adquisición de datos. La figura muestra la estructura simplificada de un microcontrolador de la familia PIC16F84. Posee una memoria para el programa (ROM), para los parámetros (EEPROM) y para el proceso (RAM). Además están los registros de control y la unidad aritmética ALU y una serie de entradas y salidas programables (4 puertos). Para poder almacenar un gran volumen de datos debe añadirse una memoria externa.

Las unidades de adquisición de datos están basadas en el empleo de sistemas de microproceso. La estructura de estos sistemas es similar a la de cualquier otro ordenador, sólo que limitado en cuanto a sus posibilidades de velocidad de cálculo o de gestión de memoria. En todos ellos podemos distinguir una Unidad Central de Proceso (CPU), una o varias unidades de entrada / salida (PUERTOS), un sistema de memorias: RAM, de lectura y escritura y ROM de sólo lectura. Las memorias ROM contienen los programas a ejecutar, mientras que las memorias RAM se utilizan como almacén de datos y para los cálculos intermedios. Las puertas de entrada / salida constituyen una parte fundamental del sistema ya que son las que permiten al sistema comunicarse con el exterior. El sistema incluye también un reloj que genera todas las señales de sincronismo que regulan el tráfico de datos entre los distintos módulos y una fuente de alimentación que proporciona las tensiones necesarias. Una característica importante de la arquitectura del sistema es el número de bits que se pueden procesar simultáneamente y la estructura de los canales de transferencia de datos entre los distintos módulos. En

general se trabaja con palabras de 8 bits en las memorias y puertos de entrada / salida, aunque la CPU pueda operar con bloques de 8, 16 ó 32 bits. Igualmente es importante considerar la capacidad máxima de memoria sobre la que puede operar directamente la CPU. Sistemas de este tipo pueden ser actualmente lo suficientemente pequeños para estar incluidos en un único circuito integrado. Aunque no forman parte directamente de la unidad de adquisición de datos hay que considerar también los conversores analógico digitales (ADC) que deben equiparla, ya que la precisión de las medidas depende precisamente del tipo de conversor que se utilice. En muchas ocasiones el conversor analógico digital se puede disponer a gran distancia de la unidad de adquisición, utilizándose una línea telemétrica digital. La gran difusión de los ordenadores hace que este tipo de líneas esté cada vez más extendido. En el extremo opuesto está el caso de muchos sistemas de microprocesador monochip que incluye también un pequeño conversor, generalmente de 8 ó 10 bits, en su interior y que permite realizar de este modo pequeñas unidades de adquisición de datos con unos pocos circuitos integrados y de muy bajo coste. Cuando se requiere mayores prestaciones en la conversión analógica digital (12, 14 ó 16 bits) es necesario acudir a configuraciones más complejas, llegándose a precisar en el caso de los conversores de 24 bits de un microprocesador cuya única misión es la de controlar la operación del conversor analógico digital.



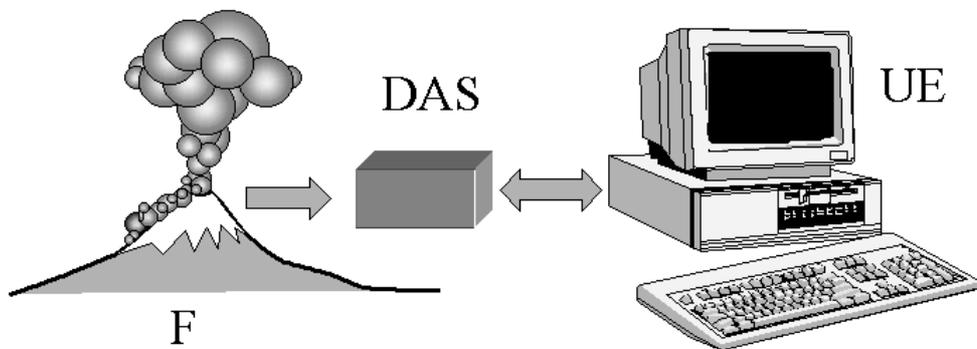
**Figura 1-20.** Un computador estándar puede utilizarse fácilmente como sistema de adquisición de datos, basta añadirle una tarjeta con un conversor analógico digital y si se quiere, un MÓDEM para comunicarse con otros computadores y poder acceder a los datos en forma remota.

### **Computadores personales como sistemas de adquisición de datos**

Cuando a la unidad de adquisición de datos se le exige una cierta capacidad de cálculo es mejor utilizar un pequeño computador, especialmente porque su programación y manejo se han hecho ya familiares a todos los operadores y su costo es muy inferior al de cualquier sistema dedicado. En el caso de que se adopte esta solución hay muchas posibilidades de adaptarlo como unidad de adquisición de datos, siendo una de las más extendidas la de incorporar en el interior del sistema de Pc una tarjeta con el conversor analógico digital directamente sobre el BUS del Pc. Sin embargo, esta solución no es posible realizarla sobre sistemas portátiles, ya que estos generalmente no disponen de BUS estándar accesible y hay que incorporar sistemas de expansión complejos y caros. En estos casos, es preferible diseñar un conversor analógico digital que se pueda conectar a alguno de los puertos estándar disponibles sobre el Pc portátil, generalmente un puerto paralelo CENTRONICS y un puerto serie RS232, aunque cada vez están más extendidas las interfases PCMCIA. Aunque es preferible utilizar puertos serie, en

ocasiones es necesario utilizar el puerto paralelo para la entrada de datos procedentes del conversor analógico digital o para controlar otro tipo de dispositivos. El sistema de puerto USB no es práctico en este tipo de aplicaciones, ya que su manejo es mucho más complejo que el puerto serie o el paralelo. Sin embargo la política comercial va a imponer, en pocos años, que este puerto sea el único disponible sobre el computador. La solución será utilizar adaptadores de RS232 a puerto USB. De esta forma el Pc va almacenando en su disco los datos procedentes de los distintos sensores conectados al conversor analógico digital. El sistema puede transferir los datos mediante el módem y a través de la línea telefónica a un ordenador central.

La gran difusión de este tipo de productos hace que hoy estos sistemas sean mucho más económicos que el desarrollo de un sistema de microproceso específico, por ejemplo cuesta menos un Pc completo que un teclado o un controlador de video. Sin embargo, la mayor ventaja que tiene la utilización de un sistema basado en un Pc, es la facilidad de operación, ya que su gran difusión hace que en todos los centros el personal esté familiarizado con su uso y programación. Pero también hay problemas en la utilización de un Pc como es que cada vez son máquinas más potentes, con más prestaciones y ello supone un mayor consumo de energía, no siempre disponible en las proximidades de un volcán activo. Y las máquinas pequeñas son difíciles, cuando no imposibles, de programar por falta de herramientas adecuadas o de la información técnica necesaria. En aplicaciones donde la energía sea crítica, vuelve a ser necesario desarrollar un computador específico, muchas veces utilizado como eslabón intermedio entre el sistema de adquisición y los Pc de adquisición y tratamiento de datos. De esta forma, se puede tener el sistema de Pc desconectado y activarlo sólo durante cortos periodos de tiempo, reduciendo drásticamente la energía necesaria.



**Figura 1-21.** Se utiliza un sistema autónomo de adquisición de datos DAS realizado mediante un microcontrolador y memorias de bajo consumo entre la fuente de datos F y el computador de almacenamiento UE que se activa sólo cuando el sistema autónomo esta lleno o para analizar periódicamente los datos.

Para bajas velocidades de adquisición de datos es posible desarrollar los programas en lenguajes tan elementales como el Basic, evidentemente, cuando hay que realizar operaciones complejas o bien la velocidad es crítica, hay que acudir a lenguajes de programación como el C o en casos extremos al lenguaje ensamblador del ordenador utilizado. Otra ventaja de la utilización directa de un sistema basado en Pc es que los datos obtenidos son ya directamente compatibles con los sistemas de explotación de los mismos. La definición de una unidad de adquisición de datos se hace estableciendo cual debe ser su capacidad y cual la velocidad de entrada y salida de la información. Esto exige conocer las características básicas de la señal dada por el elemento sensor:

Unidad de adquisición de datos	
Señal	Adquisición de datos
Velocidad de variación	Frecuencia de muestreo
Relación señal / ruido	Resolución (precisión)
Rango de variación	

Espectro característico de la señal: en Volcanología nos encontramos que las distintas señales varían entre unas pocas centésimas de segundo, como es la actividad sísmica, hasta ciclos de varios años como el campo gravitatorio o el magnético. La frecuencia de muestreo debe ser al menos doble que la frecuencia máxima que se desea estudiar. A efectos prácticos es conveniente utilizar un factor cuatro o superior. De esta forma, los filtros necesarios para evitar que señales con frecuencias superiores a la frecuencia de Nyquist ( $1/2$  frecuencia de muestreo) alcancen la unidad de adquisición de datos.

La siguiente característica que debemos conocer de la señal es la relación señal / ruido, en general, llamamos señal a la componente de origen conocido dada por el sensor, mientras que llamamos ruido a la parte cuyo origen desconocemos o bien somos incapaces de extraer información útil de ella. Es absurdo tomar datos con una resolución mayor que el ruido, pues con ello sólo se consigue encarecer el equipo y no mejorar la calidad de la información. Es necesario saber si es posible mediante algún tipo de proceso numérico de los datos obtenidos mejorar esta relación señal / ruido y en caso afirmativo decidir si este proceso se realiza en la unidad de adquisición de datos o bien en el sistema de explotación. En el primer caso deberemos dotar al sistema de adquisición de una cierta capacidad de cálculo. En el segundo caso deberemos aumentar la velocidad de muestreo y la capacidad global de memoria de almacenamiento. El conocimiento del rango de variación de la señal es importante para evitar que el equipo de medida se sature precisamente cuando los datos son más significativos. Por otra parte, el diseño del instrumento es tanto más complejo cuanto mayor sea la amplitud del rango de la señal a cubrir. La relación señal / ruido y el rango de variación de la señal deben considerarse conjuntamente para definir la resolución y precisión del instrumento. En muchos casos es imposible optimizar ambos factores simultáneamente.

- Tiempo necesario para poder confirmar una variación de un parámetro
- Numero de estaciones mínimas para poder confirmar la variación de un parámetro
- Espaciado mínimo entre estaciones para poder confirmar la variación de un parámetro
- Retardo máximo que permite la necesidad de procesado en tiempo real

La información procedente del sensor esta soportada por una señal:

- Señal analógica modulada en amplitud
- Señal analógica modulada en frecuencia
- Señal Digital

La detección de un nivel de alarma exige realizar una modificación de los parámetros de configuración de la unidad de adquisición de datos:

- Velocidad de muestreo
- Amplificación
- Nivel de referencia (cero)
- Longitud del registro

# REPRESENTACIÓN MATEMÁTICA

## Qué nos dice un instrumento

Ya hemos visto que un instrumento es una interfase con el mundo físico. Como entrada se tiene un fenómeno físico y a la salida se obtiene una información parcial de ese fenómeno. En general esa información la obtenemos mediante una magnitud que varía en función de la entrada (sistema analógico) o bien mediante números (sistema digital). En todo caso el tratamiento de cómo funciona un instrumento y las relaciones que existen entre su entrada y su salida se realiza mediante un *modelo matemático* del sistema.

**Figura 2-1.** El análisis de un instrumento se realiza considerando una función de transferencia que relaciona la salida con la entrada.



La aproximación más sencilla es suponer un instrumento ideal en el cual la señal de entrada  $E(t)$  varía con el tiempo y a su salida tenemos otra señal  $S(t)$  que también varía con el tiempo. La *función de transferencia* de un sistema se define como el cociente de la *transformada de Laplace* de la señal de salida con respecto a la *transformada de Laplace* de la señal de entrada:

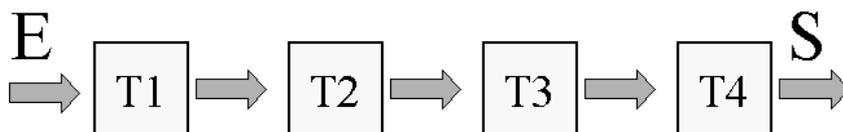
$$L(s) = \frac{L(S(\tau))}{L(E(\tau))}$$

recordemos que la transformada de Laplace se define como:

$$L(F(\tau)) = \int_0^{\infty} e^{-s\tau} F(\tau) d\tau = f(s)$$

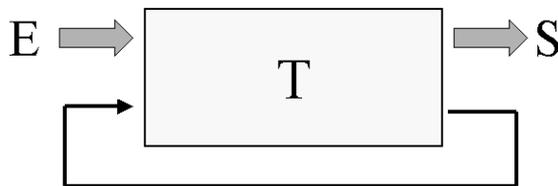
La función  $F(\tau)$  se puede obtener a partir de  $f(s)$  mediante la transformada inversa de Laplace. Esto nos permite obtener la señal de entrada en función de la señal presente en la salida. La función de transferencia de un sistema complejo se puede obtener en función de las funciones de transferencia de cada uno de los elementos que lo componen. La función de transferencia de un conjunto de elementos en serie (cada uno de ellos tiene como señal de entrada la señal de salida del elemento anterior) se obtiene multiplicando las funciones de transferencia correspondientes a cada uno de los elementos.

$$T(s) = T_1(s) \cdot T_2(s) \cdot T_3(s) \cdot T_4(s)$$



**Figura 2-2.** La función de transferencia de una serie de elementos es el producto de las funciones de transferencia

Sin embargo, cada uno de los elementos que constituyen un instrumento incorpora a la señal de salida otra señal generada en el propio elemento o procedente de interferencias con otros fenómenos y que se conoce como *ruido*. El ruido generado en un instrumento se refiere a la entrada como si se tratara de una señal (*nivel de ruido equivalente a la entrada*). Es importante tener presente que toda señal de entrada menor que este nivel NO puede ser detectada.

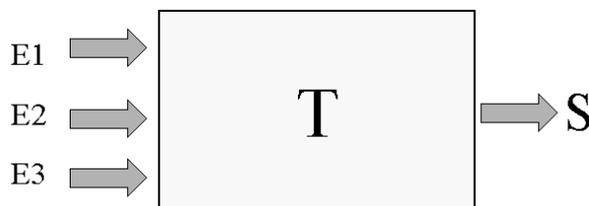


**Figura 2-3.** La realimentación es una técnica habitual para estabilizar un sistema.

Un efecto muy frecuente es que una parte de la señal de salida se transfiere otra vez a la entrada. Este efecto se conoce como *realimentación*. Bajo determinadas condiciones, la realimentación estabiliza el sistema y puede mejorar sus características globales, en otros casos conduce a inestabilizar el sistema, provocando oscilaciones o llevando al sistema fuera de sus límites de trabajo (saturación).

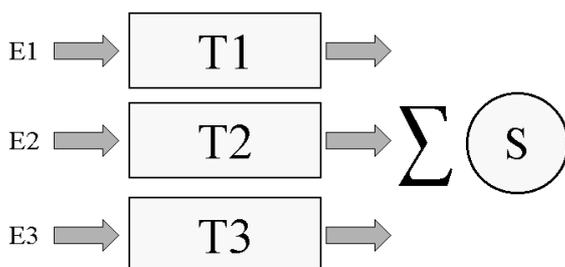
### Medidas multiparamétricas

En el mundo físico los fenómenos son muy complejos y frecuentemente aparecen interferencias entre distintas magnitudes, tanto a nivel del sensor como directamente en forma de parámetros que condicionan el fenómeno. Esto es tanto más acusado cuanto mayor es la sensibilidad de los instrumentos empleados



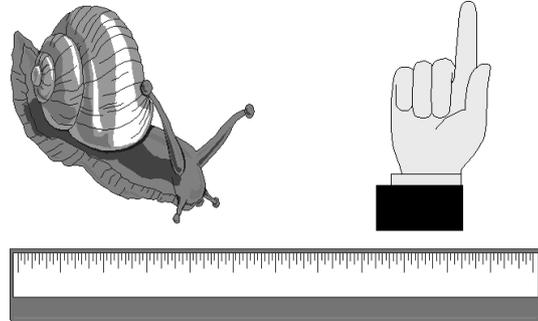
**Figura 2-4.** Un instrumento diseñado para estudiar un determinado proceso (E1) puede presentar interferencias con otros fenómenos (E2 y E3).

La solución cada vez más adoptada es ampliar el número de instrumentos, de modo que puedan medirse cada vez más parámetros y, basándose en un largo proceso de búsqueda de correlaciones entre los distintos datos, definir las funciones de transferencia que caracterizan la influencia de cada uno de los parámetros en el desarrollo del fenómeno. Esta es la aproximación que se sigue actualmente para tratar de definir los posibles precursores de un terremoto o de una erupción.



**Figura 2-5.** En muchos casos es necesario disponer de múltiples instrumentos para poder determinar las influencias mutuas entre los distintos fenómenos.

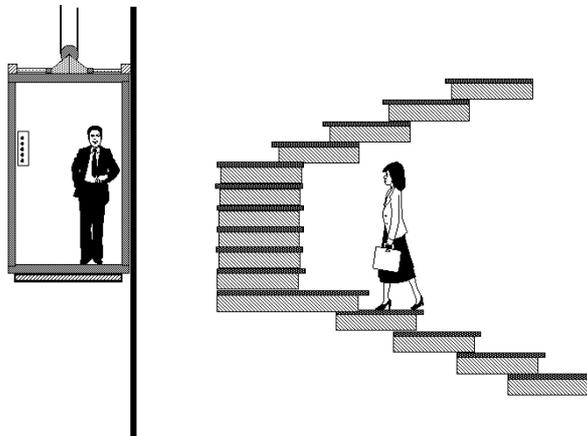
El tratamiento analítico de cada uno de los instrumentos debe hacerse de forma que en él se consideren todas las señales que puedan influir en la señal de salida. El conjunto de instrumentos debe poder definir cada una de ellas y además se debe disponer de suficiente número de instrumentos redundantes a fin de poder diferenciar los efectos de carácter local de los regionales.



**Figura 2-6.** Ejemplo de sistema analógico, digital y mixto.

### Sistemas analógicos y digitales

Los sistemas digitales están en la misma base de nuestra cultura, si la ciencia existe es porque tenemos números y tenemos números porque tenemos dedos. En cambio, el término analógico requiere una más compleja introducción, analógico procede de análogo y data de aquellos tiempos, no tan lejanos, en los que muchos problemas se tenían que resolver experimentalmente, buscando un sistema análogo que respondiera a las mismas ecuaciones y que pudiéramos reproducir en el laboratorio. Todavía hoy hay muchos problemas de la mecánica de los fluidos que sólo pueden resolverse analógicamente.

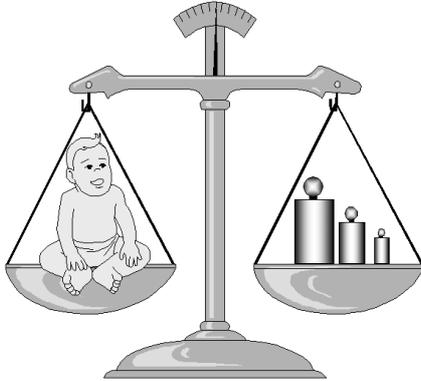


**Figura 2-7.** No siempre los sistemas digitales son más eficaces que los analógicos.

Además, se piensa erróneamente que todo sistema digital es mejor que un sistema analógico y, en muchas ocasiones, la solución analógica es más rápida, más sencilla y mucho más barata. De hecho, los coches para avanzar llevan ruedas que son un sistema analógico y no patas que sería el sistema digital. El conocimiento de sí un sistema, en su esencia, responde de un modo analógico o digital no sólo simplifica el proceso de medida, sino que siempre mejora la precisión de la misma. Muchos procesos muy complejos, como puede ser la gestión de las grandes catástrofes, aceptan una digitalización sencilla del tipo *todo* o *nada*. Estos dos únicos niveles (0/1) permiten después construir complejos sistemas de decisión.

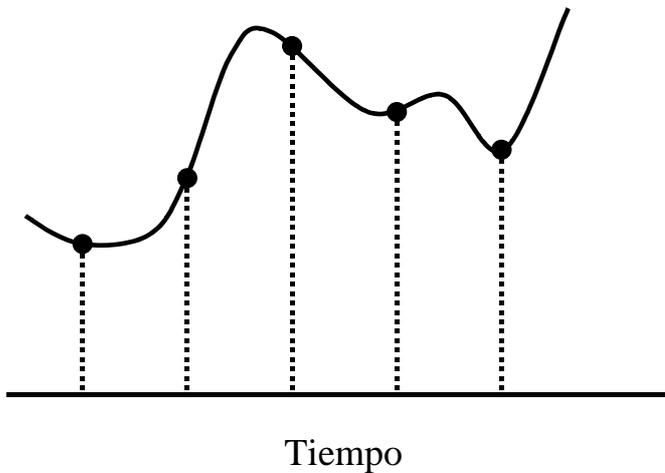
## Muestreo y retención

En el mundo de la instrumentación nos encontramos que muchos de los aparatos que consideramos analógicos, en realidad son digitales, y es que no sólo se trata de medir un objeto, sino que debemos dar un número y este número representa a ese objeto en el momento en el que se hizo la medida.



**Figura 2-8.** Cada cierto tiempo se realiza un muestreo del bicho.

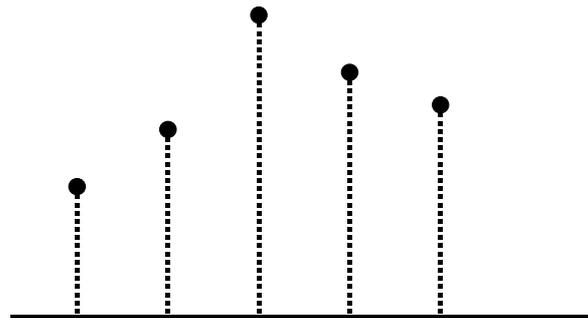
Este proceso nos introduce dos conceptos fundamentales en el mundo digital: muestreo y digitalización. Supongamos que estamos siguiendo el peso de un bicho, cada cierto tiempo se le pesa y obtenemos un número que representa el peso del bicho en ese momento.



**Figura 2-9.** Muestreo: cada cierto tiempo se realiza una medida.

Pero esta información es parcial ya que sólo conocemos el peso en los momentos en que se ha pesado y desconocemos totalmente que ha pasado entre dos medidas.

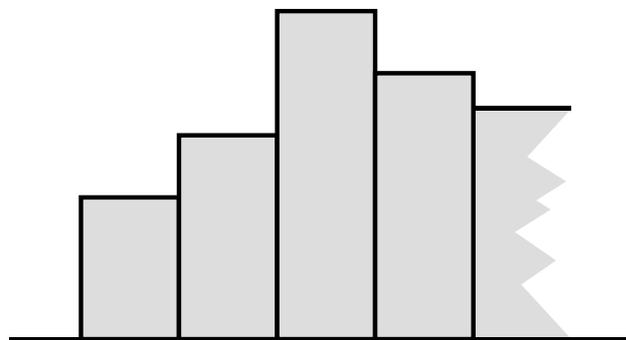
**Figura 2-10.** Sólo tenemos la información correspondiente al instante en el que se ha realizado la medida.



El seguimiento correcto supondría estar realizando continuamente pesadas, determinar cual es el muestreo óptimo exige un conocimiento exhaustivo del fenómeno a medir, especialmente de su evolución temporal. Cuando estamos midiendo un proceso que presente fuertes fluctuaciones y además muy rápidas, el problema de la definición del período de muestreo se agrava. En general, se procede a medir a intervalos iguales, aunque en algunos casos el muestreo con intervalos variable pueda aportar una mayor información del fenómeno. Cuando el muestreo se realiza regularmente, el *intervalo de muestreo* es uno de los parámetros más importantes del proceso de la digitalización, y se suele expresar como *número de muestras por unidad de tiempo* o simplemente expresando la *frecuencia* de muestreo en Hz.

Supongamos que se mide una señal con una frecuencia de muestreo  $f_m$ . La señal, a nuestros efectos, ha desaparecido y sólo tenemos los valores que corresponden a cada uno de los instantes del muestreo.

**Figura 2-11.** Retención: entre medida y medida asignamos a la señal el valor de la última medida.

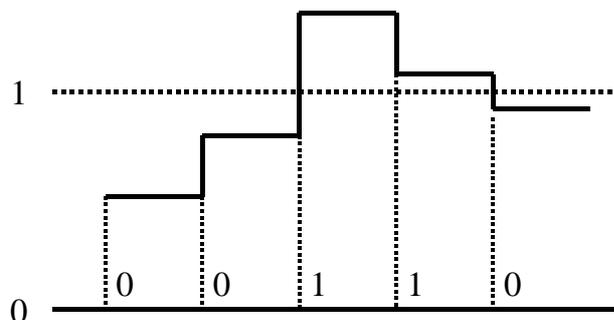


Entre medida y medida, el valor que tenemos para la señal es el correspondiente a la última medida realizada. A esta función se la denomina *retención*. En general el muestreo y la retención se ejecutan consecutivamente y por el mismo dispositivo, por lo que habitualmente nos encontramos con dispositivos de *muestreo y retención* (*Sample&Hold*).

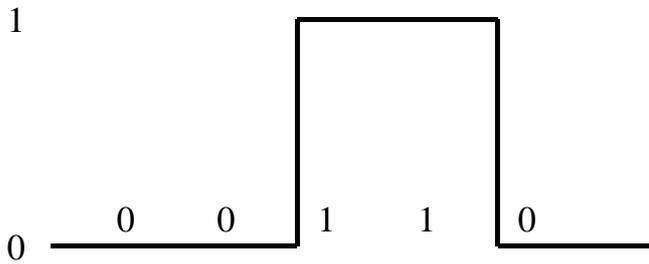
## Digitalización

La siguiente etapa consiste en la cuantificación (*digitalización*) de la medida, para ello se compara cada muestra retenida con un nivel, según supere o no dicho nivel se le asigna un 0 ó un 1.

**Figura 2-12.** Digitalización: se compara la señal con un nivel de referencia. Se asigna 1 si es mayor y 0 si es menor.

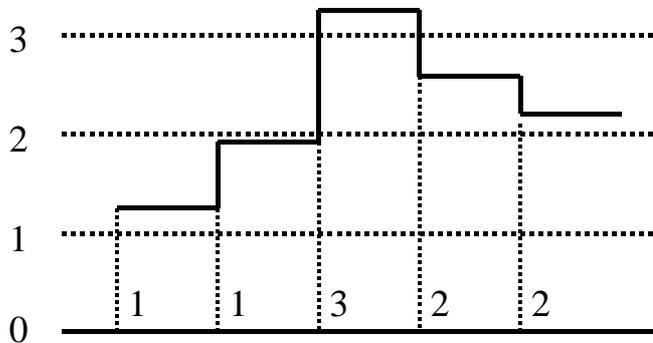


La señal está ahora representada por la secuencia de números 0,0,1,0. Sin embargo la representación que obtenemos si pretendemos restaurar la señal original es muy pobre.

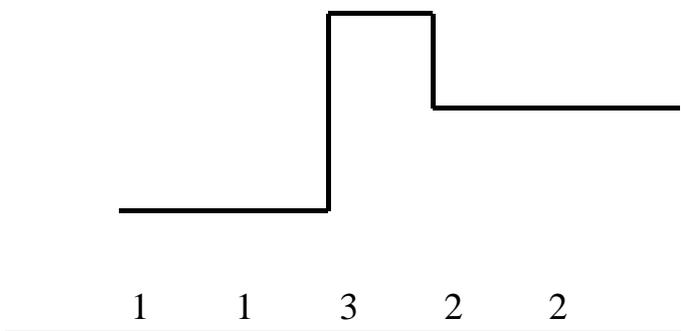


**Figura 2-13.** La reconstrucción de la señal con dos niveles es muy deficiente.

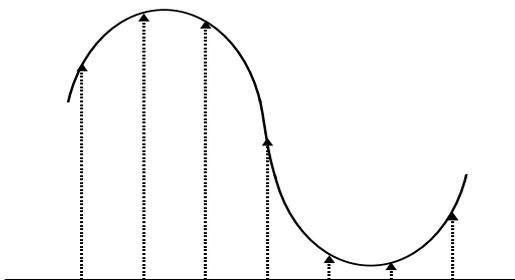
La situación mejora si en vez de comparar con sólo 2 niveles lo hacemos con cuatro aunque todavía es muy difícil reconocer en ella la señal original.



**Figura 2-14.** Digitalización con cuatro niveles.



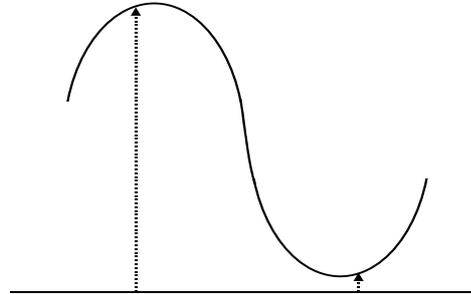
**Figura 2-15.** Reconstrucción de una señal digitalizada con cuatro niveles.



**Figura 2-16.** Muestreo de una señal sinusoidal.

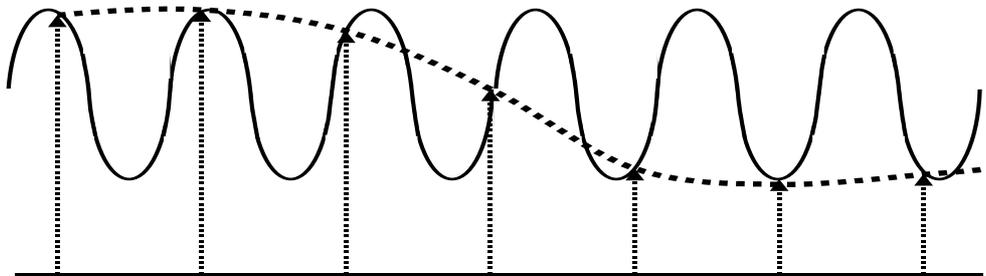
## Frecuencia de muestreo

El conocimiento de la señal será tanto mejor cuanto más elevada sea la resolución del cuantificador y más elevada la frecuencia de muestreo. Para que todavía podamos reconocer que es una función sinusoidal no podemos muestrear menos de dos veces por ciclo.



**Figura 2-17.** El muestreo debe ser al menos de dos muestras por ciclo.

Si la señal a muestrear posee una frecuencia mayor que la mitad de la frecuencia de muestreo se nos presenta el fenómeno del *aliasing*



**Figura 2-18.** Si el muestreo es inferior a dos muestras por ciclo aparece el fenómeno del aliasing. La reconstrucción de la señal (línea de trazos) corresponde a una señal de frecuencia menor.

## Representación matemática

Una señal se representa mediante una función continua del tipo:

$$S(t) \quad -\infty < t < \infty$$

Una señal se denomina periódica de periodo T cuando se cumple:

$$S(t) = S(t + T) \quad -\infty < t < \infty$$

Una señal es de energía limitada cuando se cumple:

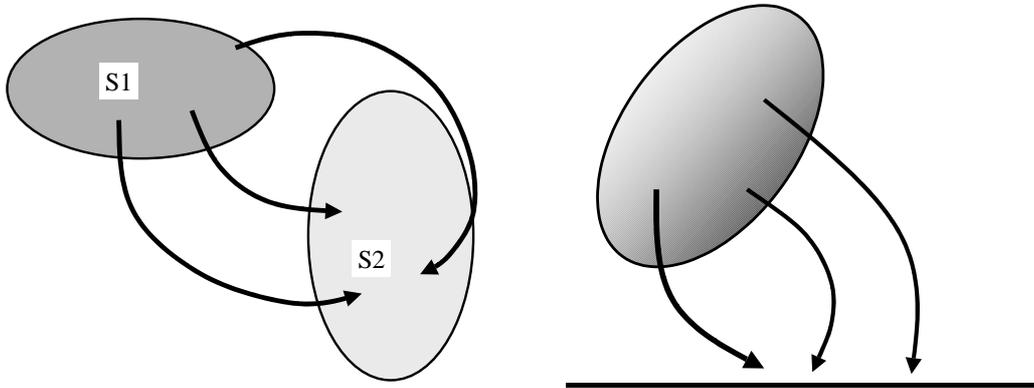
$$E > \int_{-\infty}^{\infty} S^2(t) dt$$

Una señal se denomina de duración limitada cuando se anula fuera de un intervalo de tiempo especificado:

$$S(t) = 0 \quad t < t_1$$

$$S(t) = 0 \quad t > t_2$$

Una aplicación no es más que una regla por la cual elementos de un conjunto S se asignan a elementos de otro conjunto.



**Figura 2-19.** Una aplicación es una regla por la cual los elementos de un conjunto S1 se asignan a elementos de otro conjunto S2 . Un caso particular, de gran interés en el proceso de señales es la aplicación del conjunto de las señales en el eje real.

En proceso de señales la transformación más frecuente es la transformada de Fourier. Si S<sub>1</sub> es el conjunto de las señales de energía acotada:

$$S_1 = \left\{ x, \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt \right\}$$

La transformada de Fourier es una aplicación en otro conjunto S<sub>2</sub> de funciones de cuadrado integrable:

$$S_2 = \left\{ X, \int_{-\infty}^{\infty} X^2(f) df \right\}$$

Esta aplicación está descrita por:

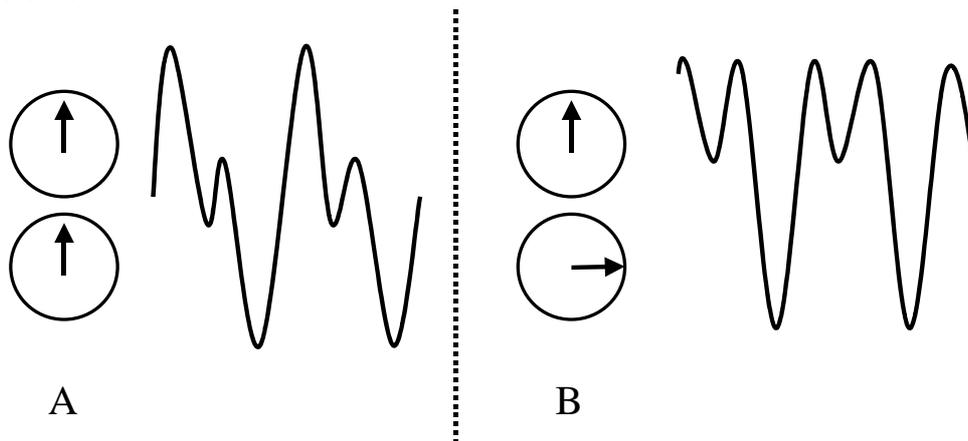
$$S_1 \Rightarrow S_2 \quad X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi f i t} dt$$

donde  $i = \sqrt{-1}$ . La transformación inversa es

$$S_2 \Rightarrow S_1 \quad x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{2\pi f i t} df$$

Al conjunto S<sub>1</sub> se le denomina espacio *tiempo* y al conjunto S<sub>2</sub> espacio *frecuencia*. El resultado X(f) de aplicar una transformada de Fourier a un señal x(t) se denomina *espectro* de la señal x(t). Siempre debe tenerse presente que ambos espacios son distintos. Sin embargo cuando se tiene la solución de un problema en uno de los

espacios, simultáneamente se tiene la solución en el otro, la cual podrá tener interés práctico o no.



**Figura 2-20.** La figura muestra dos señales obtenidas superponiendo dos componentes sinusoidales de distinta frecuencia, sin diferencia de fase (A) y con una diferencia de fase de  $\pi/2$  (B).

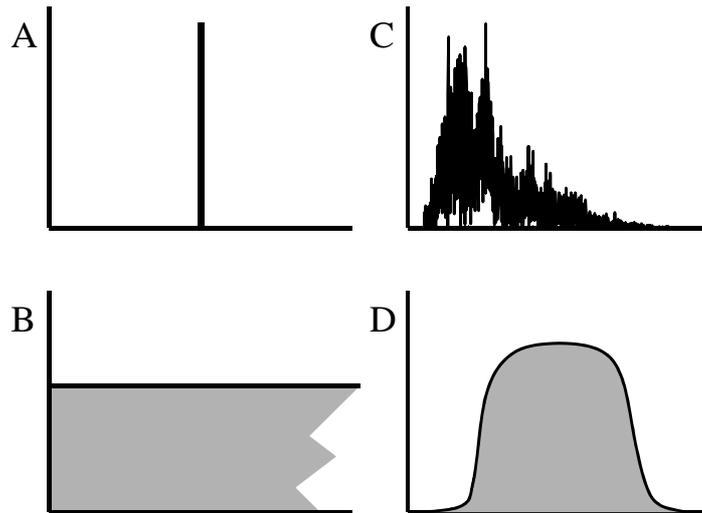
Es importante destacar que a una señal definida en el tiempo, le corresponde un espectro de frecuencias, pero no hay que olvidar que a cada frecuencia le corresponde una fase. El espectro nos dice cuales son las componentes armónicas de la señal pero también cual es la relación de fases inicial existente entre ellas. Las mismas amplitudes en el espectro no tienen porque corresponder a las mismas señales. Cuando nos quedamos sólo con el espectro de amplitudes estamos perdiendo información sobre la señal. El problema radica en que es mucho más fácil trabajar con amplitudes que con fases, además la calibración de la respuesta en amplitud de un instrumento se puede realizar con equipos modestos, mientras que la calibración en fase exige técnicas mucho más sofisticadas. Las características espectrales permiten establecer también una clasificación de los distintos tipos de señales, de modo similar a como se ha hecho anteriormente en el espacio tiempo: Una señal es *monocromática* cuando su espectro sólo es distinto de cero en un sólo punto. Una señal se dice que tiene un espectro *blanco* cuando todas las frecuencias presentan la misma amplitud. Cuando eso sólo ocurre dentro de un ancho de banda entre  $f_1$  y  $f_2$  se dice que la señal presenta un espectro *rosa*. Una función de banda limitada es aquella cuyo espectro se anula fuera de un determinado margen de frecuencias  $F$ . Una función de energía limitada que tiene un especial interés es la función *delta* de Dirac o función *impulso*, definida de la siguiente forma:

$$\delta(x) = 0 \quad |x| > 0$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1$$

Obsérvese que con esta definición de la función  $\delta(x)$  se cumple:

$$s(t) \delta(t - \tau) = s(\tau)$$



**Figura 2-21.** Ejemplos del espectro de distinto tipo de señales: (A) señal monocromática, (B) ruido blanco, (C) ruido sísmico registrado con un geófono de corto periodo, (D) ruido rosa.

De acuerdo con esto, la operación del muestreo de una señal  $s(t)$  se puede representar mediante:

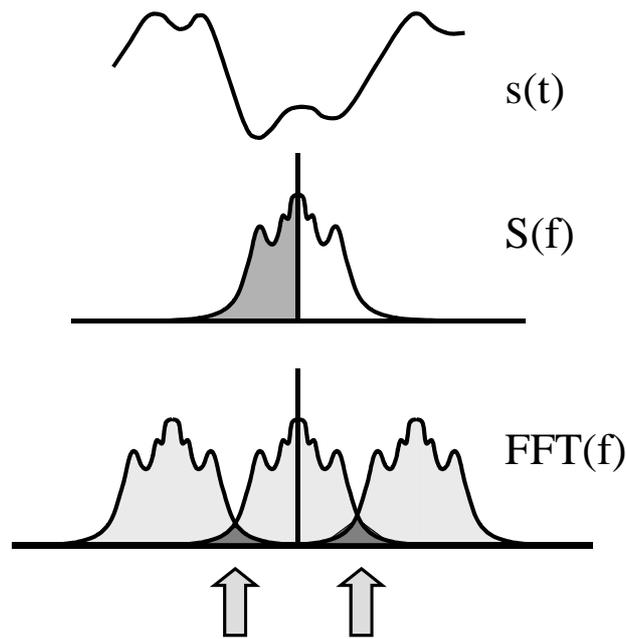
$$s_m = s(t)\delta(t - \infty) + \dots + s(t)\delta(t - 3\tau) + s(t)\delta(t - 2\tau) + \\ + s(t)\delta(t - \tau) + s(t)\delta(t) + s(t)\delta(t + \tau) + s(t)\delta(t + 2\tau) + \\ + s(t)\delta(t + 3\tau) + \dots + s(t)\delta(t + \infty)$$

o lo que es lo mismo:

$$s_m = \sum_{i=-\infty}^{\infty} s(t) \delta(t - i)$$

Es decir, el muestreo de una señal se reduce a multiplicar la señal por una serie de funciones delta espaciadas el intervalo de muestreo.

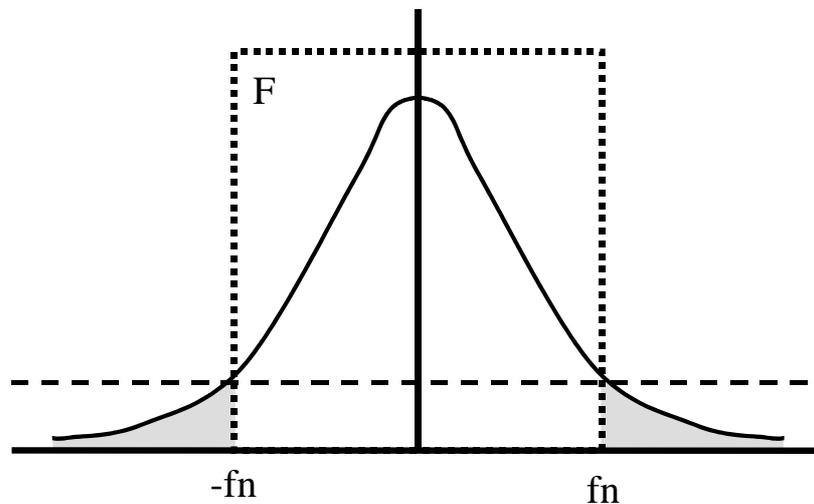
Es importante tener presente que así como el espectro de una señal es una función continua, el espectro de una señal muestreada es discontinuo y además se repite cada intervalo de frecuencias igual a la frecuencia de muestreo (espectro imagen). El problema surge cuando la señal no es de ancho de banda limitado a menos de la mitad de la frecuencia de muestreo, ya que en tal caso, hay una fracción del espectro que se superpone con los espectros imagen, apareciendo el fenómeno del aliasing. Para evitarlo, la única solución es limitar el espectro de la señal por debajo de la mitad de la frecuencia de muestreo o frecuencia de *Nyquist*.



**Figura 2-22.** La figura muestra el espectro  $S(f)$  de una señal continua  $s(t)$  y el espectro  $FFT(f)$  de la misma señal muestreada. Obsérvese la repetición del espectro con periodicidad la frecuencia de muestreo y el solapamiento de los espectros.

## Filtros

Un filtro es un dispositivo que permite modificar el espectro de una señal. Estos dispositivos se pueden implementar antes del muestreo (filtros analógicos) o después de la digitalización (filtros digitales). Sin embargo, si queremos evitar que se nos produzca el fenómeno del aliasing, deberemos situar el filtro antes del dispositivo de muestreo. Para no perder información el filtro *antialias* ideal sería un filtro rectangular con corte a la frecuencia de Nyquist, de forma que no dejara pasar ninguna frecuencia superior a la frecuencia de Nyquist y no afectara a las frecuencias inferiores.



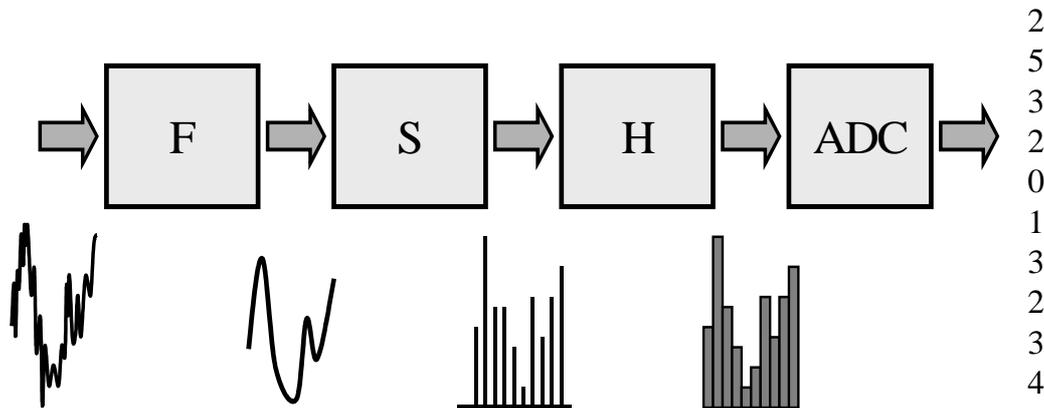
**Figura 2-23.** Para evitar el fenómeno del aliasing es necesario filtrar la señal de forma que su espectro quede limitado por debajo de la frecuencia ( $fn$ ) de Nyquist (mitad de la frecuencia de muestreo).

Un filtro *pasa bajos* deja pasar todas las frecuencias inferiores a la frecuencia de *corte*, el *filtro pasa altos* las frecuencias superiores a la de *corte*. Un filtro pasa banda deja pasar un *ancho de banda* de frecuencias centrado sobre la frecuencia *central* del filtro. El problema surge cuando en la práctica no es posible construir un filtro rectangular, sino que el filtro deja pasar todas las frecuencias, sólo que a partir de una determinada zona del espectro atenúa unas frecuencias más que otras.

La frecuencia de corte ahora no queda perfectamente determinada, por lo que por convenio se ha definido la frecuencia de corte como aquella frecuencia en la que la energía de la señal cae a la mitad (-3dB). Otro elemento a tener en cuenta es la pendiente del filtro, que se suele expresar como la atenuación que sufre la señal en dB por octava. Para un filtro pasa banda el ancho de banda se define entre los dos puntos de corte a -3dB y la frecuencia central como la frecuencia media de los dos cortes.

### Conversión analógico digital

La conversión de una señal analógica a digital requiere la combinación de todos estos elementos. Primero hay que limitar el espectro de la señal por debajo de la frecuencia de Nyquist, para lo cual se incluirá un filtro pasa bajos (F), después será necesario muestrear (S) y retener la información (H) y seguidamente se procederá a cuantificarla mediante el conversor analógico digital propiamente dicho. Si se desea poder trabajar con distintas velocidades de muestreo deberemos diseñar el filtro pasa bajos de forma que sea posible ajustarlo a las distintas frecuencias. Todos estos elementos habrá que concebirlos de forma que no se pierda información, pero tampoco diseñar el sistema por encima de nuestras necesidades, ya que ello supone un coste mucho más elevado así como una mayor demanda de energía y dificultad de calibración y mantenimiento.

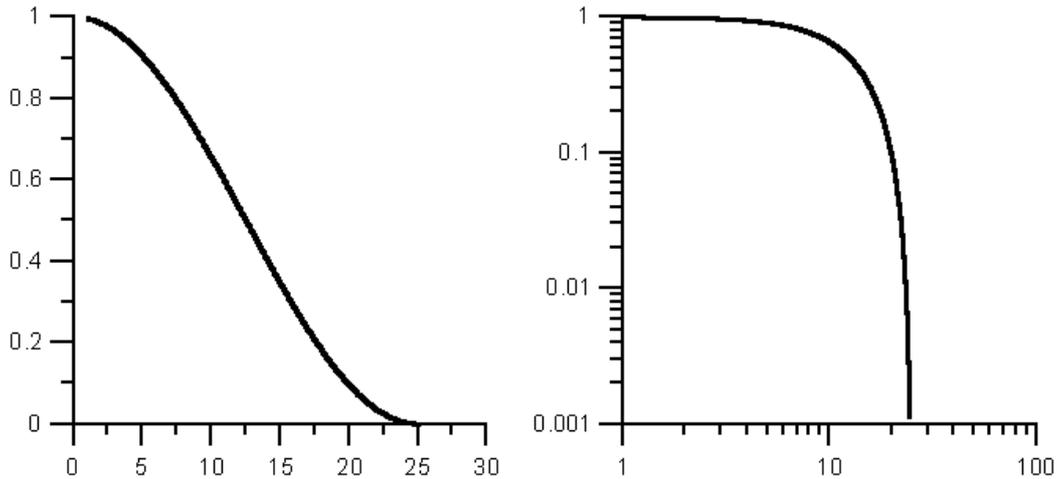


**Figura 2-24.** La figura muestra el conjunto de funciones necesarias para digitalizar una señal. (F) filtro de entrada, (S) muestra, (H) retención, (ADC) conversor analógico digital.

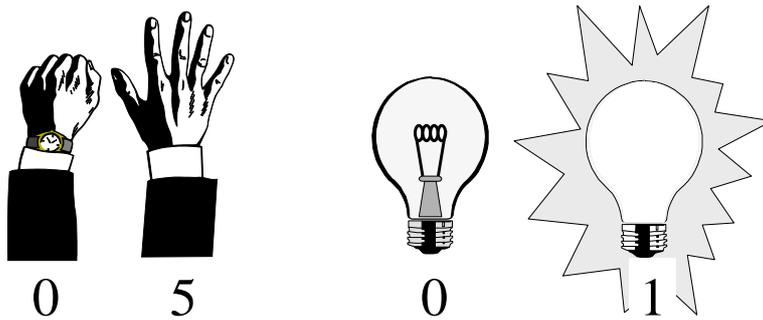
### Determinación de la respuesta en frecuencia

En un dispositivo analógico la respuesta en frecuencia se puede obtener fácilmente a partir del conjunto de funciones de transferencia correspondientes a cada uno de los módulos. De hecho hay muchos programas de diseño electrónico que construyen la

función de transferencia del circuito de modo automático. Otra solución es aplicar un impulso a la entrada y analizar la respuesta en frecuencia de la salida. Este método es muy difícil de realizar directamente con métodos analógicos, pero es muy fácil en sistemas digitales, ya que podemos aplicar un algoritmo para el cálculo de la transformada de Fourier directamente a la serie de datos digitales obtenida a la salida del sistema. Como ejemplo se muestra la determinación de la respuesta en frecuencia de un filtro ampliamente utilizado en sistemas de adquisición de datos por su sencillez. Este filtro está definido por la relación de recurrencia:  $Y_{i+1} = Y_i + k (X_i - Y_i)$  con  $k = 1/32$ .



**Figura 2-25.** Respuesta temporal a una función impulso de un filtro digital pasa-bajos definido de acuerdo con las siguientes relaciones de recurrencia:  $Y_{i+1} = Y_i + k (X_i - Y_i)$  con  $k = 1/16$ . y la respuesta en frecuencia del filtro



**Figura 2-27.** El sistema de numeración decimal parte de tener diez dedos y tenemos un diez caracteres para representarlo (0,1,2,3,4,5,6,7,8,9). El sistema binario sólo contempla dos estados (apagado y encendido) y tenemos dos caracteres para representarlo (0,1).

### Aritmética binaria

Estamos habituados a utilizar el sistema de numeración decimal, pero ello sólo es consecuencia natural de tener diez dedos, si el hombre hubiera desarrollado trece dedos utilizaríamos un sistema en base 13. Por ello, no debe extrañarnos que al ir

desarrollando determinados autómatas se hayan ido introduciendo paralelamente otros sistemas de numeración. En particular, para un sistema eléctrico (electrónico) lo más simple es utilizar dos estados, encendido y apagado, conectado o desconectado, sí o no, 0 ó 1. Formalmente, al conjunto de elementos distintos que se utilizan para establecer un sistema de numeración se le denomina base del sistema de numeración. Así tenemos un sistema de numeración de base 10 (decimal) y un sistema de numeración de base 2 (binario). Todos los computadores trabajan con un sistema de numeración binario, traduciendo los valores al sistema decimal sólo para la entrada y salida de la información. A esta unidad mínima de información se la denomina bit. Así un bit es algo que puede adoptar dos estados 0 o 1, sí o no, etc.

En el sistema decimal, cuando se agotan los caracteres pasamos a la posición siguiente a la izquierda, así el número veintiséis lo representamos como:

$$26$$

y cada posición a la izquierda representa una potencia de 10.

$$10^5 \ 10^4 \ 10^3 \ 10^2 \ 10^1 \ 10^0$$

Igualmente se hace en un sistema binario, sólo que aquí cada posición a la izquierda representa una potencia de 2.

$$2^7 \ 2^6 \ 2^5 \ 2^4 \ 2^3 \ 2^2 \ 2^1 \ 2^0$$

Así el número dos se representa:

$$10$$

Los dieciséis primeros números se pueden representar con cuatro bits:

Decimal	Binario	Hexadecimal
0	0000	0
1	0001	1
2	0010	2
3	0011	3
4	0100	4
5	0101	5
6	0110	6
7	0111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F

Para facilitar la escritura de números en binario se utiliza habitualmente el sistema hexadecimal que tiene base 16 y equivale a 4 bits. La traducción entre ambos sistemas

es inmediata. Los sistemas de cómputo operan con grupos de bits (palabras) que empezaron siendo múltiplos de 4 y actualmente son múltiplos de 8. Los sistemas más pequeños trabajan con palabras de 8 bits, que se pueden unir para representar números cada vez mayores. Una palabra de 8 bits se conoce con el nombre de Byte. Un Byte puede almacenar un número desde  $2^0$  a  $2^7 + 2^6 + 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0$  es decir de 0 a 255. El desplazar un dígito a la izquierda en el sistema decimal equivale a multiplicar por 10 y desplazarlo a la derecha a dividir por diez. Por ejemplo:

610 si se desplaza a la izquierda 6100  
 610 si se desplaza a la derecha 61

En el sistema binario es idéntico, sólo que equivale a multiplicar por 2 o a dividir por 2. Por ejemplo el número seis (0110):

0110 si se desplaza a la izquierda 1100 que es doce  
 0110 si se desplaza a la derecha 0011 que es tres

Esta propiedad es muy importante ya que permite realizar operaciones de multiplicar y dividir por 2 de forma muy rápida con sólo desplazar los bits.

### Suma de números binarios

Para sumar dos números binarios se utiliza la siguiente definición:

+	0	1
0	0	1
1	1	0*

Donde \* indica que se ha producido el acarreo de 1 bit. Por ejemplo:

00000101	5
00000110	6
00001011	11

00001000	10
00000110	6
00010000	11

### Números positivos y negativos

En el sistema de numeración decimal un número positivo y un número negativo se diferencian por un símbolo extra (-), así tenemos 5, -6, etc. En un sistema binario no es posible introducir un nuevo símbolo, pues sólo tenemos 0, 1. La solución es considerar el bit situado más a la izquierda como el bit del signo. De esta forma podríamos representar:

0000011 ( 3)

1000011 (-3)

pero esto nos lleva a complicar la operación de suma, pues la suma de un número y el opuesto debe ser 0.

00000011	3
10000011	-3
10001111	-15 ¿?

Evidentemente, esta forma de representar los números negativos no es operativa. Para solucionar este problema se introduce el siguiente procedimiento para cambiar el signo a un número: se cambian los 0 en 1 y viceversa y se suma 1 (complemento a 2):

00000011	3
11111100	0 → 1
00000001	+1
11111101	-3

Con esta definición la suma de un número y su opuesto es 0

00000101	5
11111011	-5
00000000	0

Para restar dos números basta con cambiar el signo (cambiar 0 y 1, sumar 1) y hacer una suma. De acuerdo con esto una palabra de 8 bits considerando el bit 7 como signo sería:

01111111	127
----	---
00000001	1
00000000	0
11111111	-1
----	---
10000001	-127
10000000	-128

Hay que tener esto presente cuando se trabaje con conversores analógico digitales, ya que normalmente proporcionan los datos de salida sin signo, incluso cuando operan en modo bipolar.

## Multiplicación

Para multiplicar dos números binarios podemos partir de la definición de producto y sumar el multiplicando tantas veces como indique le multiplicador. Otra posibilidad, mucho más eficiente es utilizar el desplazamiento a la izquierda como producto por dos, de esta forma una multiplicación se puede realizar sólo con desplazar y sumar.

5x10 = 50				
00000101	Multiplicador	Resultado con 16 bits		5
00001010	Multiplicando			10
00000101	Sumar (b0 = 1)	00000000 00001010	0000000000001010	10
00000101	Desplazar y pasar (b1 = 0)	00000000 00010100	-----	
00000101	Desplazar y sumar (b2 = 0)	00000000 00101000	0000000000101000	30
00000101	Desplazar y pasar (b3 = 0)	00000000 01010000	-----	
00000101	Desplazar y pasar (b4 = 0)	00000000 10100000	-----	
00000101	Desplazar y pasar (b5 = 0)	00000001 01000000	-----	
00000101	Desplazar y pasar (b6 = 0)	00000010 10000000	-----	
00000101	Desplazar y pasar (b7 = 0)	00000101 00000000	-----	
Final			0000000000110010	50

Obsérvese que el producto de dos palabras de 8 bits es una palabra de 16 bits. El producto de dos palabras de 8 bits supone realizar ocho operaciones de desplazamiento, ocho comparaciones y hasta ocho sumas y todo ello con doble precisión (dos palabras). El incluir muchas operaciones aritméticas supone mucho tiempo de cálculo para el procesador y si se utilizan sistemas mínimos enseguida se supera el tiempo disponible para realizarlo.

### Tipos de datos

En los sistemas de microproceso muy pequeños, como son los microcontroladores, sólo disponemos de palabras de 8 bits consideradas como enteros sin signo (0 a 255) con las que se puede realizar una serie de operaciones elementales:

Suma	$B1 + B2$
Resta	$B1 - B2$
Desplazamiento a la izquierda	$B1 \ll$
Desplazamiento a la derecha	$B1 \gg$
AND lógico	$B1 \cap B2$
OR lógico	$B1 \cup B2$
Incrementar	$B1 + 1$
Decrementar	$B1 - 1$

Además se puede controlar si estas operaciones provocan *arrastre*, *cero*, *negativo*. Cuando hay que repetir un conjunto de instrucciones un determinado número de veces es preferible cargar un contador y decrementar cada vez, pues cuando llegue a cero el propio procesador nos avisa y de esta forma nos ahorramos una comparación y eso supone ahorrar tiempo. En procesadores más complejos se dispone de un repertorio mayor de operaciones, pero en realidad no es cierto, sino que la máquina descompone las nuevas operaciones como combinación de las operaciones elementales. En cuanto los tipos de números que podemos utilizar en procesadores como los que ocupan los computadores personales tenemos:

Tipos enteros			
Tipo	Definición	bits	Valores
Carácter	char	8	-128 a 127
Carácter sin signo	unsigned char	8	0 a 255
Entero corto	short integer	16	-32768 a 32767
Entero corto sin signo	unsigned short integer	16	0 a 65535
Entero	integer	32	0 a 4294967295
Entero sin signo	unsigned integer	32	-214748,648 a 2147483647

Para cada uno de estos tipos están definidas las correspondientes operaciones. Es posible combinar en una operación variables de distinto tipo, pero hay que adoptar precauciones y en general habrá que realizar antes una conversión de tipos cuidando la precisión y tipo del resultado que se desea obtener.

Tipos en coma flotante				
Tipo	Definición	Precisión	bits	Valores
Flotante	float	7 dígitos	32	$1.18 \times 10^{-38}$ a $3.40 \times 10^{38}$
Flotante doble	double	15 dígitos	64	$2.23 \times 10^{-308}$ a $1.79 \times 10^{308}$
Flotante largo	long double	18 dígitos	80	$3.37 \times 10^{-4932}$ a $1.18 \times 10^{4932}$

La representación de un número en coma flotante en binario es algo artificiosa y se debe ir con mucho cuidado ya que no todos los procesadores adoptan exactamente la misma definición. Podemos definir los números más pequeños que 1 en función de potencias negativas de 2

$$\dots 2^8 2^7 2^6 2^5 2^4 2^3 2^2 2^1 2^0 2^{-1} 2^{-2} 2^{-3} 2^{-4} 2^{-5} 2^{-6} 2^{-7} 2^{-8} \dots$$

un número de 8 bits con 3 fraccionarios se representará en la forma

$$b_4 b_3 b_2 b_1 b_0.b_{-1} b_{-2} b_{-3}$$

La definición más extendida (*IEEE 754 Floating Point Standard*) introduce dos tipos de 32 y 64 bits:

32 bits		
1 bit	8 bits	23 bits
signo	Exponente	Mantisa

64 bits		
1 bit	11 bits	52 bits
signo	Exponente	mantisa

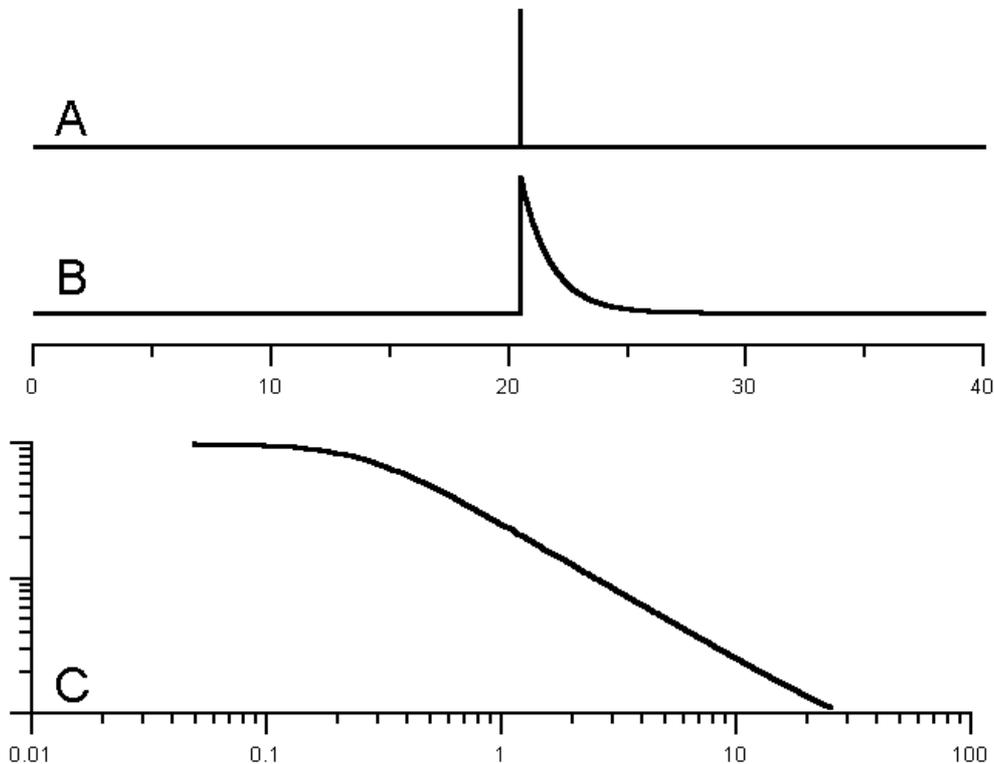
La mantisa se supone normalizada, es decir desplazada a la izquierda hasta que el bit más significativo sea 1, y como siempre es 1 se suprime, por lo que habrá que incorporarlo cada vez que queramos reconstruir un número en coma flotante a formato decimal. El exponente se almacena desplazado para que siempre sea positivo (+127 en el formato de 32 bits y +1023 en el de 64 bits). Un exponente con todos los bits a 1 o a 0 indica un número no válido. Este permite controlar el desbordamiento por arriba o por debajo en las distintas operaciones. Por ejemplo se trata de representar  $-3/16$  en formato binario en coma flotante (float)

Normalización	-3/16	- ( 2 <sup>-3</sup> + 2 <sup>-4</sup> )
Desplazamiento del exponente	-3 + 127	01111100
Signo y magnitud	-3	1 110000000000000000000000
Eliminar el primer bit de la mantisa		100000000000000000000000
Representación final	1 01111100	100000000000000000000000

En general, en los sistemas muy pequeños no hay necesidad de utilizar números en coma flotante, pues difícilmente podremos implementar las librerías matemáticas para operar con ellos, pero si es frecuente tener que convertir un formato en otro. Hemos visto que la representación de un número en binario requiere utilizar varias palabras, el orden que se utiliza para almacenar estas palabras en el computador depende del tipo de procesador que se utilice, así Intel y Motorola utilizan criterios distintos, por lo que frecuentemente es necesario realizar funciones de conversión.

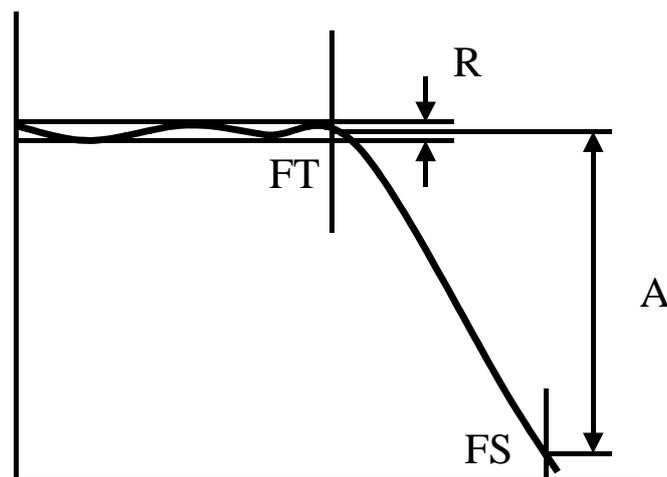
### Filtros digitales

Son muchos los algoritmos que se han desarrollado para implementar funciones de filtrado digital. Aquí sólo vamos a tratar los más sencillos y que son los más aptos para operar en sistemas de microproceso en tiempo real, donde las posibilidades de cálculo aritmético son muy reducidas. En la bibliografía se presentan referencias que tratan el tema exhaustivamente.



**Figura 2-28.** Proceso seguido para obtener la respuesta en frecuencia de un filtro digital. A) se construye una función impulso (valor cero en todos los puntos menos en uno de ellos que se selecciona hacia la mitad de la secuencia). B) se obtiene la función filtrada. C) se calcula la transformada de Fourier discreta (FFT) que nos da la respuesta del filtro.

Estos filtros tienen muchas aplicaciones, como es mejorar la relación señal ruido, separar la señal en múltiples ventanas frecuenciales, eliminar la deriva de cero, etc. Sin embargo no sirven como filtro antialias, es decir la señal de entrada en el conversor tienen que tener su espectro limitado a la mitad de la frecuencia de muestreo. En caso contrario el espectro se contamina y ya es imposible recuperar la señal original. Otro tema es reducir la frecuencia de muestreo de una señal: supongamos una señal de frecuencia  $f_1$  que se desea transformar en otra de frecuencia  $f_2$  con  $f_1 > f_2$ . Para ello filtramos  $f_1$  con un filtro pasa bajos de frecuencia de corte menor que  $f_2/2$  y seguidamente se reduce el muestreo tomando un punto de cada  $f_1/f_2$ . En la práctica es muy frecuente que se reduzcan series de datos temporales alegremente, simplemente eliminando los puntos sobrantes y sin tener presente que esto puede dar origen a la aparición de frecuencias falsas debidas a fenómenos de aliasing. También es frecuente que se midan sistemas cada cierto tiempo (una hora, un día) y no se tengan en cuenta la posibilidad de fenómenos de aliasing. Como ejemplo podemos citar la medida de inclinómetros en volcanes activos, donde la presencia del temblor volcánico (tremor) perturba considerablemente la medida. La única solución es medir a una frecuencia muy alta, por encima de la frecuencia de respuesta del instrumento y después reducir mediante un filtrado digital adecuado la serie de medidas a la frecuencia de muestreo deseada.



**Figura 2-29.** Parámetros necesarios para definir un filtro pasa bajos: FT frecuencia de corte (banda transmitida). FS frecuencia de supresión (banda suprimida). R rizado. A atenuación.

## Filtros FIR

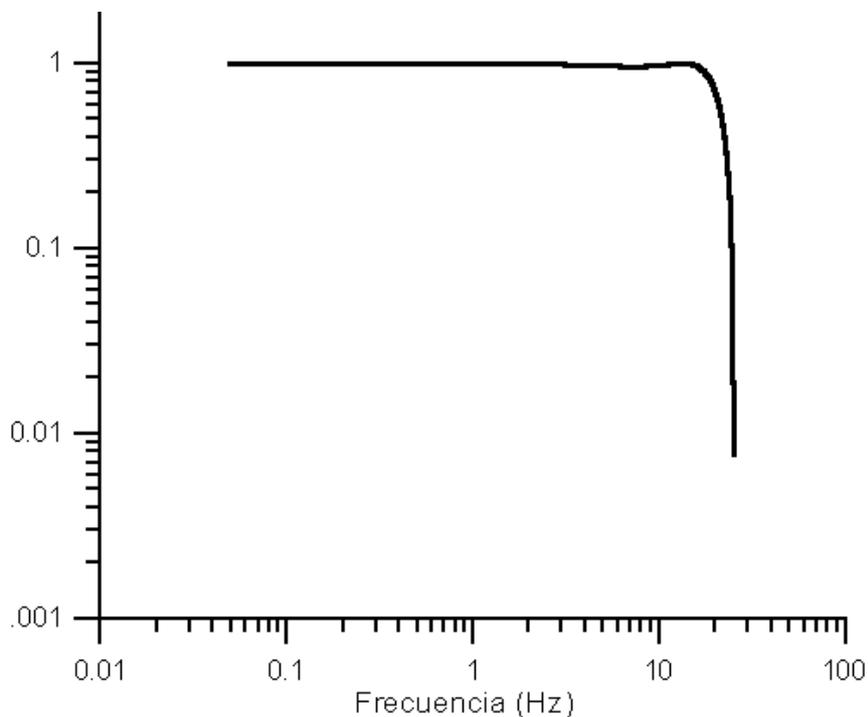
Un sistema FIR es un sistema lineal invariante en el tiempo que tiene una respuesta impulsional de duración finita (FIR *finite-duration impulse response*) en contraposición a los sistemas IIR que presentan una respuesta infinita (IIR *infinite-duration impulse response*). Un filtro FIR está definido en la forma:

$$Y_i = \sum_k b_k X_{i-k}$$

La implementación de este tipo de filtros precisa la ejecución de  $M-1$  posiciones de memoria para guardar los datos de entrada,  $M$  multiplicaciones y  $M-1$  sumas, por lo que

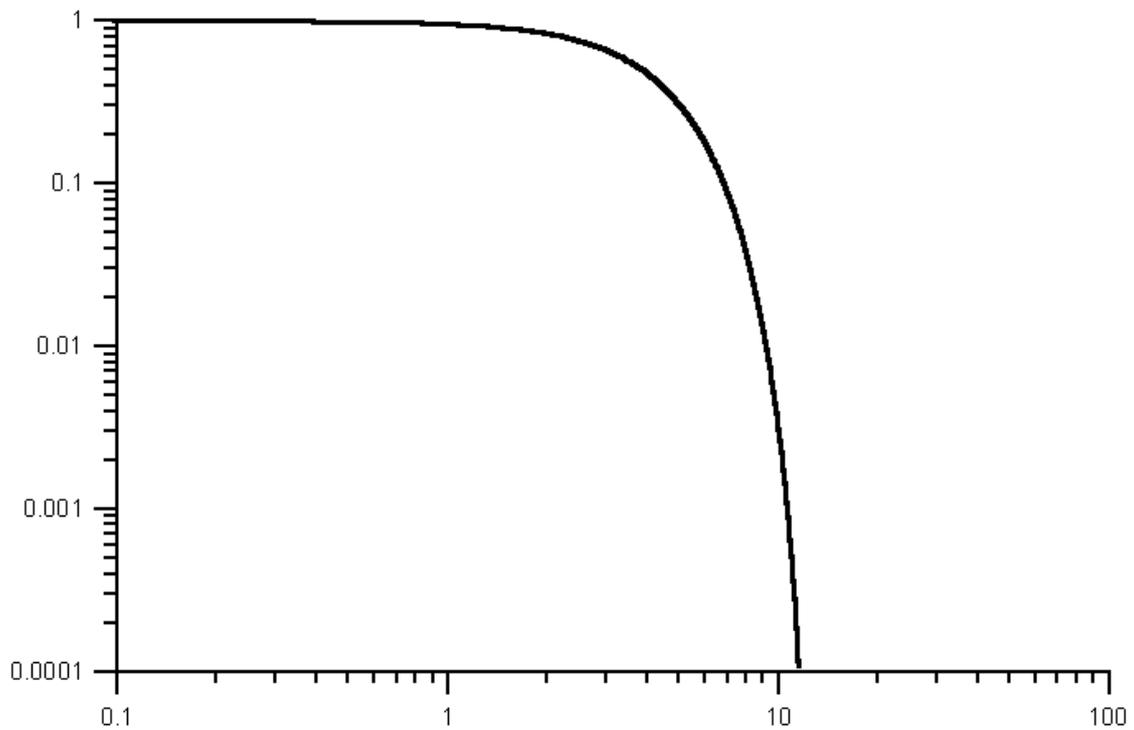
sólo es posible implementarlos eficazmente en sistemas dotados de procesador matemático o especialmente diseñados para el tratamiento de señales como son los DSP (*Digital Signal Processor*). Como este tipo de filtro es simétrico (o antisimétrico) es posible reducir a la mitad el número de multiplicaciones utilizando más memorias para guardar los productos intermedios. La respuesta impulsional del filtro es idéntica a los coeficientes del filtro. Esto permite partir de la respuesta del filtro y mediante FFT inversa calcular los coeficientes, debiéndose realizar sucesivas aproximaciones hasta obtener un resultado aceptable. Es conveniente empezar con un número muy grande de coeficientes e ir reduciéndolo hasta alcanzar un compromiso entre respuesta y número de coeficientes. Actualmente existen muchas utilidades que permiten calcular en forma sencilla estos coeficientes y la mayoría de los programas de cálculo matemático, junto con las utilidades de análisis espectral (FFT) incluyen métodos para determinar los coeficientes de este tipo de filtros. Como ejemplo de filtros FIR se muestran dos filtros pasa bajos y un filtro pasa banda

Filtro pasa-bajos	
Frecuencia de muestreo	50 Hz.
Frecuencia de corte	16 Hz.
Frecuencia de supresión	25 Hz.
Rizado en banda transmitida	1 db
Atenuación	200 db
N	Coeficiente FIR
0	0.045189931861
1	-0.149673814469
2	0.613367234529
3	0.613367234529
4	-0.149673814469
5	0.045189931861



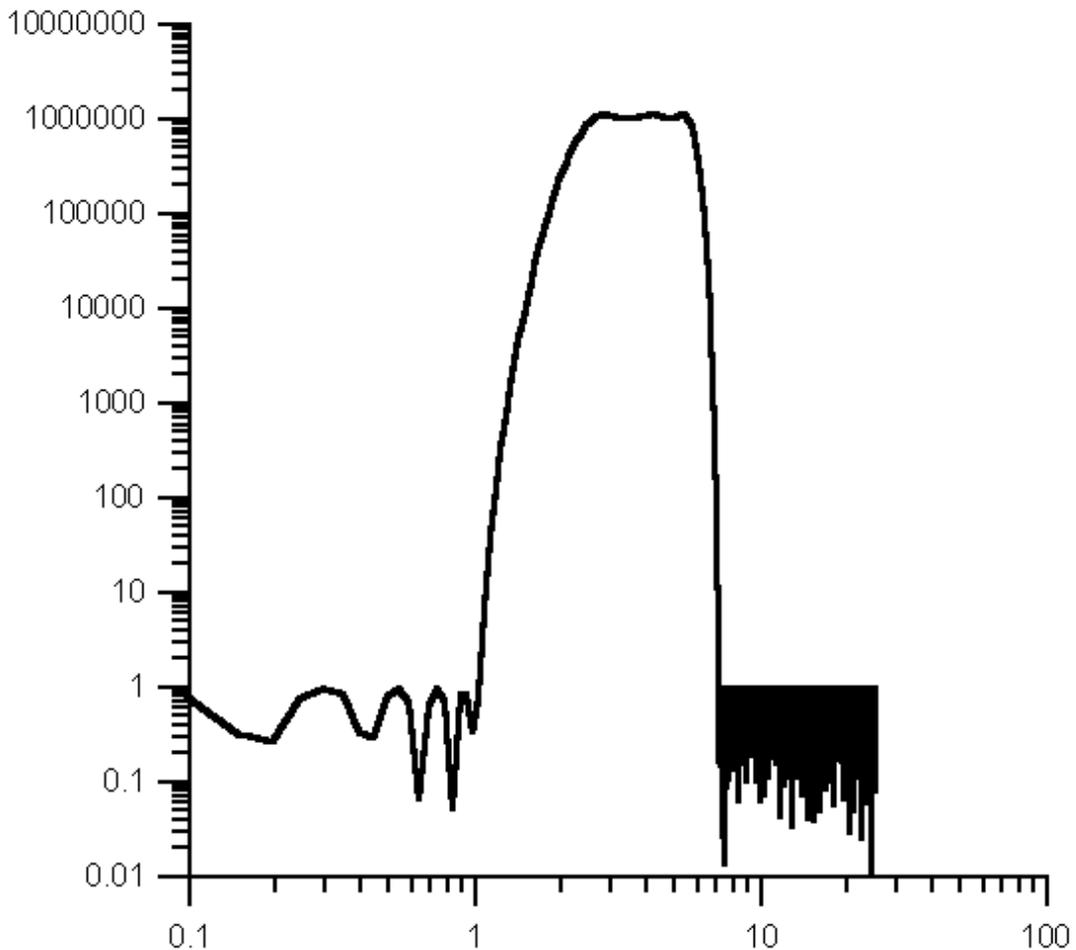
**Figura 2-30.** Filtro FIR pasa bajos de 16 Hz. realizado con seis coeficientes.

Filtro pasa-bajos	
Frecuencia de muestreo	50 Hz
Frecuencia de corte	1 Hz
Frecuencia de supresión	12 Hz
Rizado en banda transmitida	1 db
Atenuación	100 db
N	coeficiente
0	0.000216313943
1	0.001708293189
2	0.007096948054
3	0.020437565525
4	0.045217990231
5	0.080957510955
6	0.120756055191
7	0.152603096394
8	0.164834348339
9	0.152603096394
10	0.120756055191
11	0.080957510955
12	0.045217990231
13	0.020437565525
14	0.007096948054
15	0.001708293189
16	0.000216313943



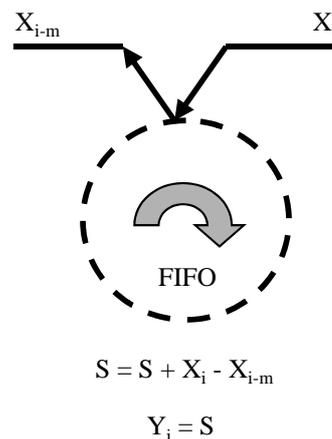
**Figura 2-31.** Filtro FIR pasa bajos de 1 Hz. realizado con diecisiete coeficientes.

No es fácil obtener la expresión analítica de la función de transferencia de este tipo de filtros y por consiguiente poder diseñar el filtro a partir de una serie de ecuaciones de diseño. Lo que lo más sencillo es implementar el filtro, obtener la respuesta a un impulso y calcular la FFT para obtener la respuesta en frecuencias, modificando los parámetros hasta obtener la respuesta deseada.



**Figura 2-32.** Filtro FIR pasa banda entre 2 Hz. y 6 Hz. realizado con ciento treinta y tres coeficientes. Obsérvese que fácilmente el número de coeficientes aumenta hasta hacerse inmanejable en aplicaciones en tiempo real que deben operar con pequeños sistemas de microproceso. Se ha incluido un número muy grande de décadas en el eje Y para poder mostrar la elevada atenuación que presenta el filtro fuera de la banda transmitida.

**Figura 2-33.** Implementación de un filtro digital de promedio utilizando una memoria FIFO (*First-In First-Out*) de longitud  $m$ . Primero se lee el contenido de la celda ( $X_{i-m}$ ) y se resta del acumulador, después se escribe en dicha posición el dato ( $X_i$ ) y se suma al acumulador  $S$ . El valor del acumulador es la salida del filtro. Este procedimiento es muy fácil de implementar, pero requiere memoria para almacenar  $m$  datos, lo cual puede ser problemático cuando se utilizan microcontroladores.

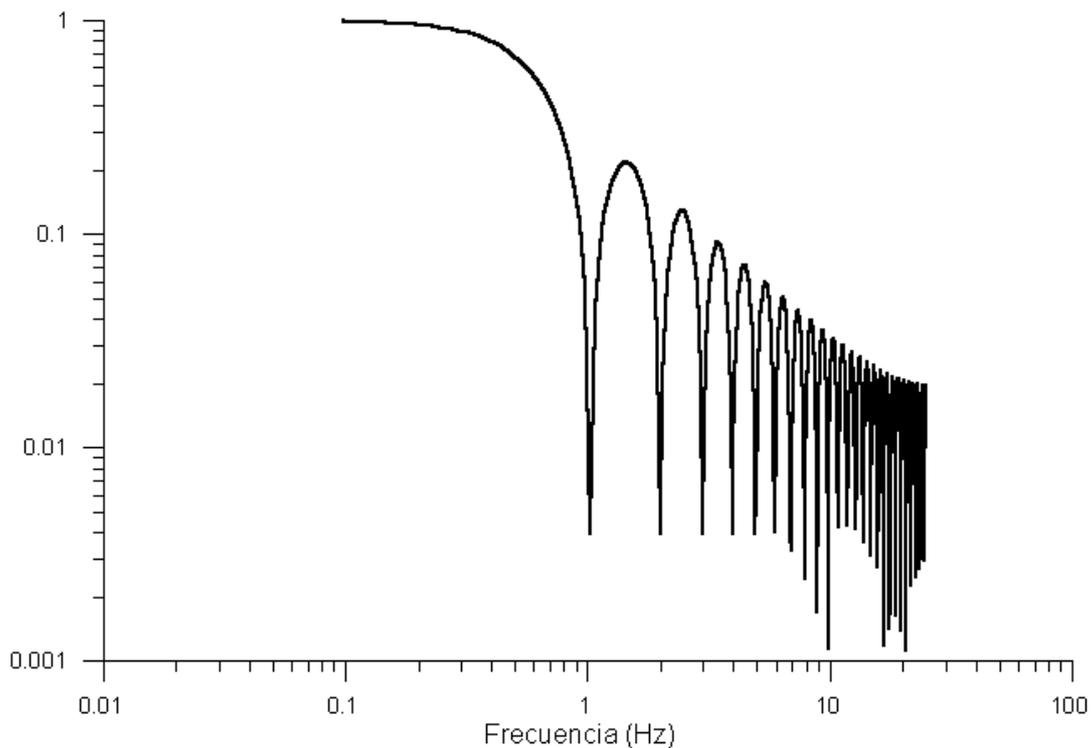


## Filtros FIR de fácil implementación

La utilización práctica de un filtro FIR pasa por resolver dos problemas: el cálculo de los coeficientes y la implementación en el procesador. La solución práctica al primer punto pasa por la utilización de un herramienta específica, mientras que el segundo requiere utilizar un procesador con un mínimo de capacidad para la realización de cálculo aritméticos y si el número de coeficientes es muy elevado, fácilmente el sistema se saturará o habrá que acudir a frecuencias de reloj muy elevadas con el consiguiente aumento de consumo. Sin embargo es posible utilizar filtros FIR de fácil implementación donde el número de operaciones a realizar se ha simplificado al máximo. El filtro digital FIR más sencillo es aquel cuyos coeficientes tienen todos el valor 1. Este filtro equivale a promediar la señal a lo largo de una ventana móvil, es decir sustituye el valor de la señal por el valor medio de un determinado número de datos.

$$Y_i = \sum_{j=0}^m X_{i-j}$$

donde  $X_i$  es la serie de datos de entrada y  $Y_i$  la serie de datos filtrados. El índice  $m$  es el número de datos que se promedia. Para poder realizar fácilmente el valor medio se elige el número de datos igual a una potencia de 2.



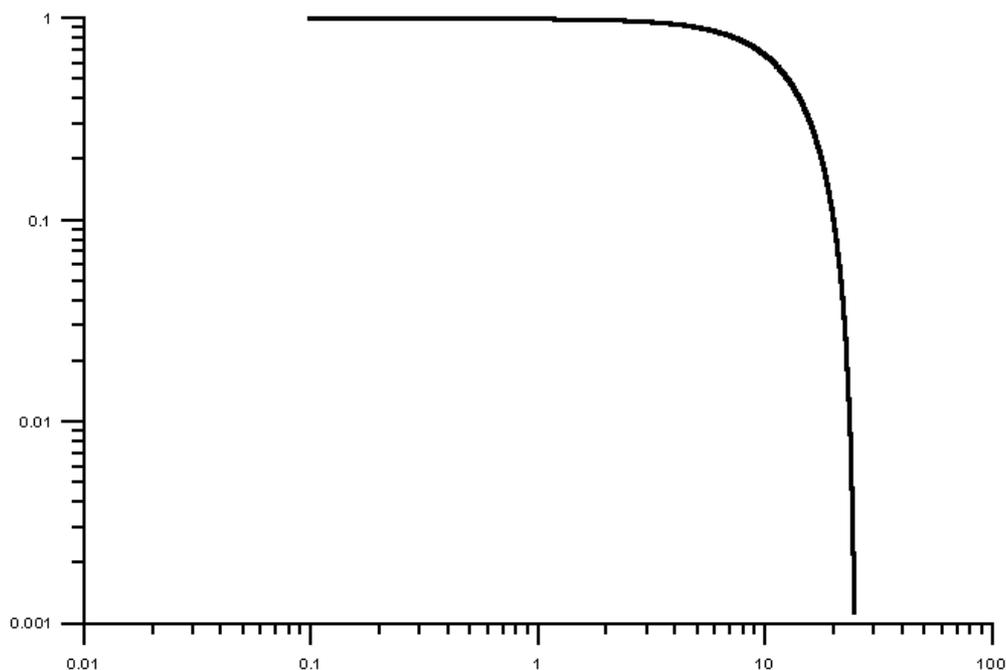
**Figura 2-34.** Respuesta de un filtro de promedios con una anchura de 50 muestras y frecuencia de muestreo de 50 Hz. Obsérvese la fuerte oscilación que se presenta fuera de la banda transmitida.

Una forma rápida de implementar este filtro consiste en utilizar una memoria circular de longitud  $m$ , que inicialmente tienen todos los datos a 0 y la salida (suma de todos los elementos) es obviamente 0. En cada paso el dato de entrada se suma a la salida y se

resta el dato que entro hace m pasos. De esta forma sólo se requiere utilizar una operación de suma y una de resta. Es preciso destacar el comportamiento de este filtro en la banda suprimida, en la que aparecen lóbulos cuya amplitud v disminuyendo paulatinamente, respondiendo a una ley del tipo:

$$|H(s)| = \frac{|\sin(x)|^n}{x^n}$$

Este tipo de respuesta puede presentar problemas en algunas aplicaciones y en general no es tenido en cuenta. Por ejemplo muchos de sistemas de adquisición de datos por conteo de impulsos tienen este tipo de respuesta. La respuesta en frecuencia de muchos conversores de tecnología delta sigma es también de este tipo. En todos estos casos es conveniente limitar la respuesta en frecuencia, intercalando un filtro pasa bajos analógico entre el sensor y el conversor analógico digital.



**Figura 2-35.** Respuesta de un filtro Daniel.

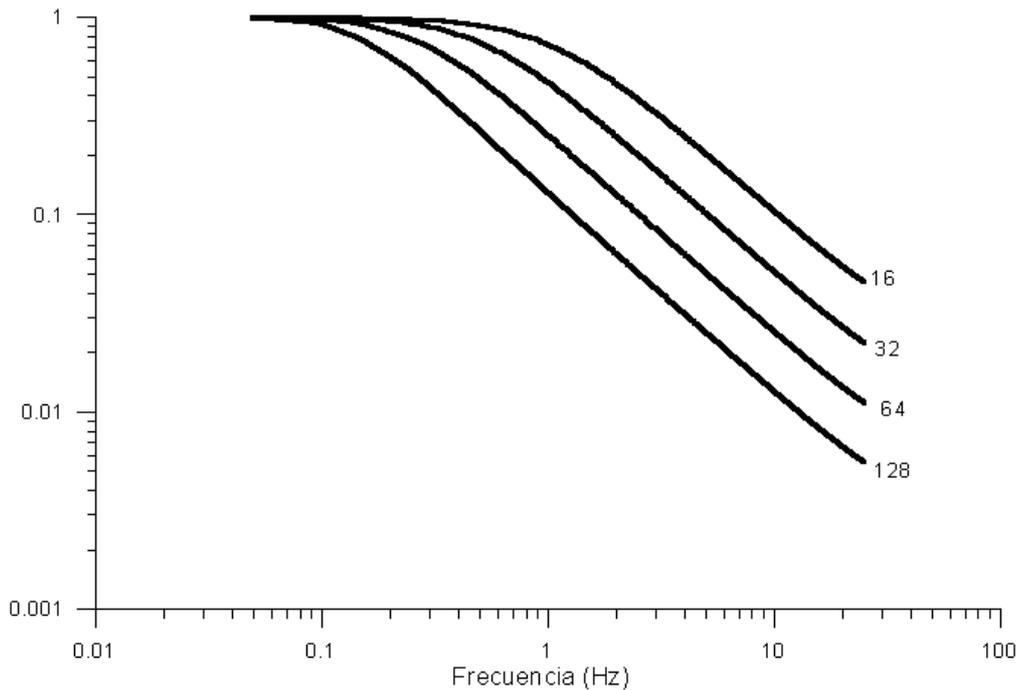
Otro filtro de FIR y también muy fácil de implementar es el filtro triangular o filtro Daniel. Este filtro tienen una longitud de 3 y los coeficientes son:

Filtro Daniel o triangular		
A0	A1	A2
0.25	0.5	0.25

Este filtro consiste en sumar un número impar de muestras divididas por una potencia de 2, por ejemplo:

$$Y_i = \frac{1}{4}(X_{i-1} + X_{i+1}) + \frac{1}{2}X_i$$

Como puede observarse en su realización práctica este filtro sólo requiere operaciones de suma y desplazamiento, por lo que es muy sencilla su codificación en el lenguaje ensamblador de los microcontroladores. Este filtro se utiliza frecuentemente para reducir el ruido de alta frecuencia en sistemas sencillos de registro sísmico.



**Figura 2-36.** Respuesta de cuatro filtros de recurrencia  $Y = Y - (X - Y)/K$  con constantes de 16, 32, 64 y una frecuencia de muestreo de 50 Hz. Obsérvese la regularidad que presenta fuera de la banda transmitida.

### Filtros IIR

Esta familia de filtros (IIR *infinite-duration impulse response*) presenta respuesta impulsional infinita. En su forma más general un filtro IIR está definido como:

$$Y_i = \sum_k a_k X_{i-k} + \sum_k b_k Y_{i-k}$$

Es decir la señal filtrada se obtiene a partir de la serie de datos de la señal de entrada y de la serie filtrada. Mientras que los filtros FIR eran intrínsecamente estables, los filtros IIR pueden presentar oscilaciones o bien la salida tender a infinito (saturaciones). El filtro IIR más sencillo está definido mediante una relación de recurrencia de la forma:

$$Y_i = Y_{i-1} + \frac{1}{K}(X_i - Y_{i-1})$$

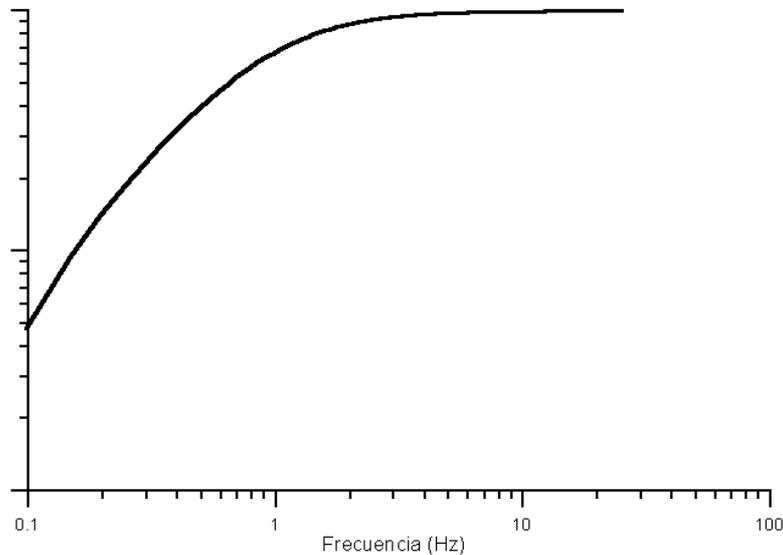
donde  $K$  es la constante del filtro. En general se hace  $K$  igual a una potencia de dos para poder realizar la división por simple desplazamiento de bits. De acuerdo con la definición de los coeficientes del filtro IIR sería:

Filtro de desplazamiento	
A0	B0
1/K	1-1/K

Es muy fácil realizar un filtro pasa altos a partir de un filtro pasa bajos (siempre que la amplificación en la banda transmitida sea 1), pues basta con restar de la señal original la señal filtrada:

$$Z_i = X_i - Y_{i-1}$$

Este tipo de filtros de muy sencilla implementación se utiliza frecuentemente para cancelar el offset en sistemas de registro sísmico con valores de  $1/K$  superiores a varios minutos. También se utiliza para calcular rápidamente los valores medios de la señal en algoritmos de disparo del tipo LTA/STA.

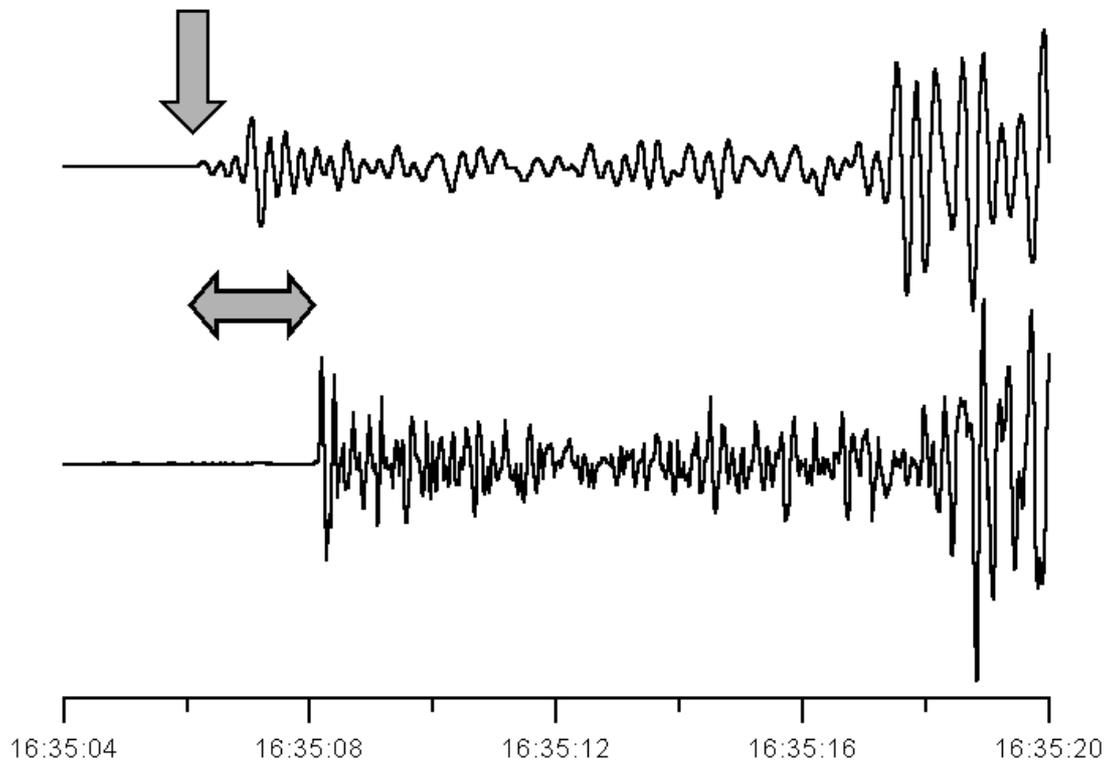


**Figura 2-37.** Respuesta de un filtro pasa altos construido a partir de un filtro de recurrencia  $Y = Y - (X - Y)/K$  con  $K = 16$ .

### Consideraciones sobre filtrado

Un filtro modifica el contenido espectral de una señal, pero no hay que olvidar que ello también supone importantes cambios en la representación temporal de la señal y esto no siempre se tiene en cuenta. Por ejemplo una señal muy impulsiva aparece como emergente después de ser filtrada o se produce un desplazamiento temporal del máximo de la señal en función de la longitud del filtro y de su implementación. Estos efectos son

especialmente dramáticos cuando se utilizan filtros con pendientes de corte elevadas y pueden conducir a importantes errores en la estimación de los tiempos de llegada o de las polaridades en el análisis de las señales sísmicas.



**Figura 2-38.** Efectos del filtrado mediante un filtro FIR pasa bajos de 111 coeficientes del inicio de un sismo tectónico ocurrido en Lanzarote el 22 de enero de 2001 a las 16:35. Las flechas muestran la transformación del inicio de la señal de impulsiva a emergente y el desplazamiento temporal debido a una mala implementación del filtro.

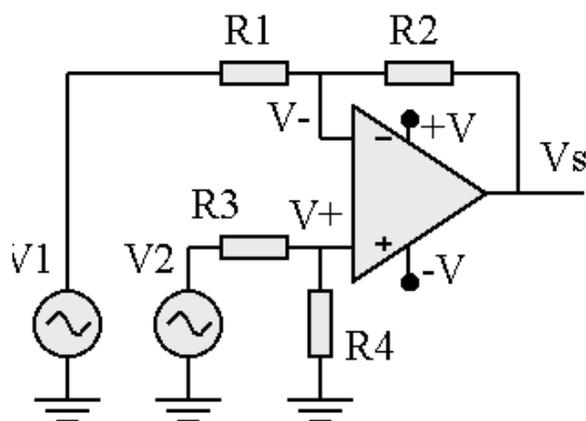
Finalmente, recordar que estos efectos también los producen los filtros analógicos, pues son inherentes al propio concepto de filtrado como modificación del contenido espectral de la señal.

## INTRODUCCIÓN A LA ELECTRÓNICA ANALÓGICA.

### El amplificador operacional. Principios básicos

En la actualidad el amplificador operacional puede considerarse el componente básico en el campo de la electrónica analógica. En sus orígenes, allá por 1940 su uso estaba restringido al campo del cálculo analógico para resolver ecuaciones integro-diferenciales. A partir del desarrollo masivo de la electrónica integrada es un componente de uso común. Se trata de un amplificador con entrada diferencial, acoplado en continua, de muy gran ganancia, presenta impedancia de entrada muy elevada y de salida muy baja.

**Figura 3-1.** Circuito básico de un amplificador operacional



En el circuito de la figura 3-1 se tiene:

$$V_+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2$$

El principio de superposición para circuitos lineales se expresa como:

$$V_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_S$$

teniendo presente  $V_S = A_{VD} (V_+ - V_-)$  se obtiene

$$V_S = \frac{A_{VD}}{1 + A_{VD}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left( \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 \right)$$

Hay que tener presente que: las resistencias  $R$  pueden ser impedancias complejas que se expresan en función de la variable Laplace  $s$  en la forma:

$$Z_R = R \quad Z_L = Ls \quad Z_C = \frac{1}{Cs}$$

En tal caso también se deben considerar funciones de  $s$  las tensiones de entrada y salida  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_S$ . En la práctica  $A_{VD}$  es suficientemente grande para que sea válida la aproximación:

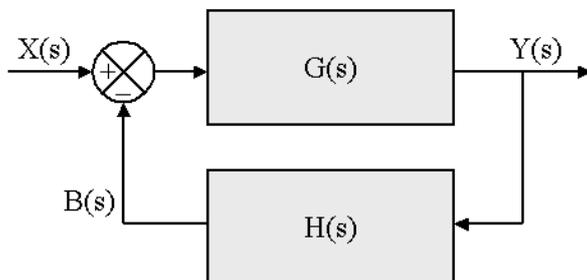
$$V_S = - \left( \frac{R_2}{R_1} V_1 - \frac{R_4 (R_1 + R_2)}{R_1 (R_3 + R_4)} V_2 \right)$$

Considerando el principio de masa virtual:

$$V_+ = \frac{V_S}{A_{VD}} + V_-$$

y para  $A_{VD}$  suficientemente grande queda:  $V_+ = V_-$

### Función de transferencia de un circuito con realimentación negativa



**Figura 3-2.** Circuito básico de un sistema con realimentación negativa

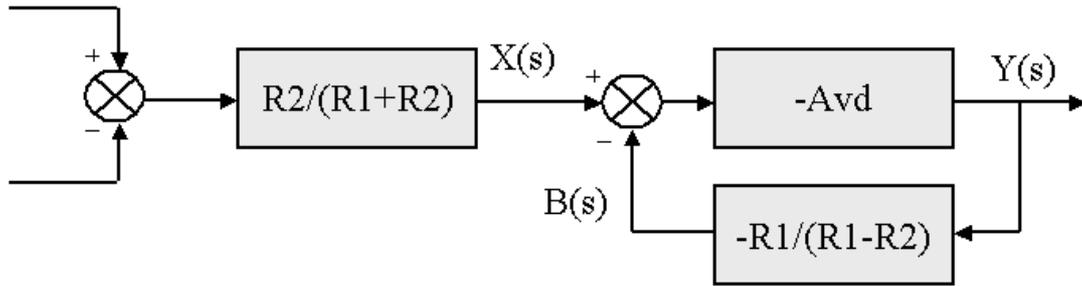
De acuerdo con la figura 3-2 se tiene:

$$E(s) = X(s) - B(s)$$

$$Y(s) = G(s) E(s)$$

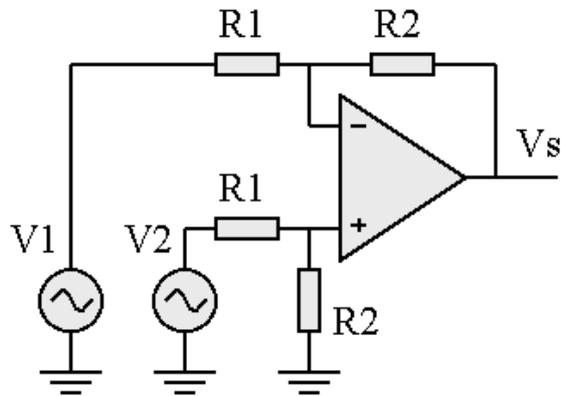
$$B(s) = H(s) Y(s)$$

$$M(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) H(s)}$$

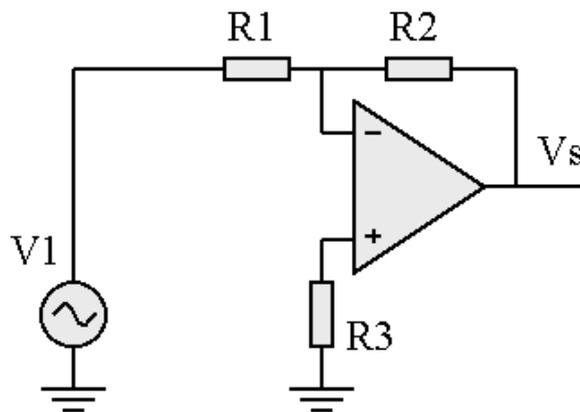


**Figura 3-3.** Diagrama de bloques del amplificador operacional de la figura 1 ( $R_3 = R_1$  y  $R_4 = R_2$ )

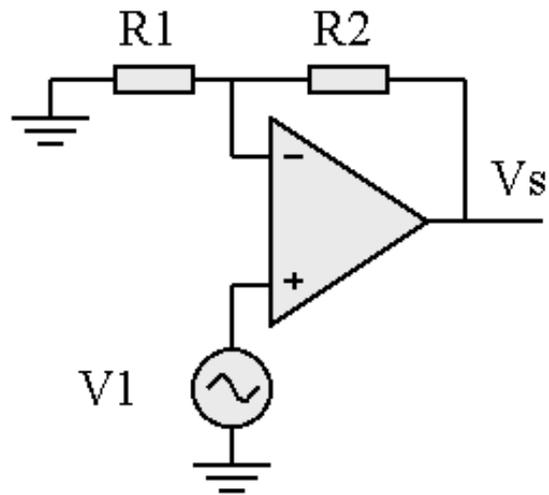
### Configuraciones básicas



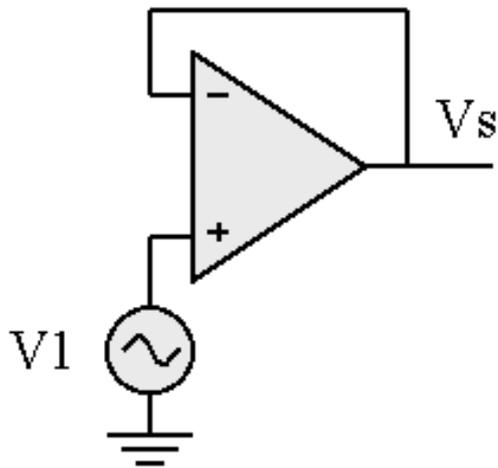
**Figura 3-4.** Amplificador diferencial básico. La tensión de salida es proporcional a la diferencia de tensiones de entrada ( $V_1 - V_2$ )



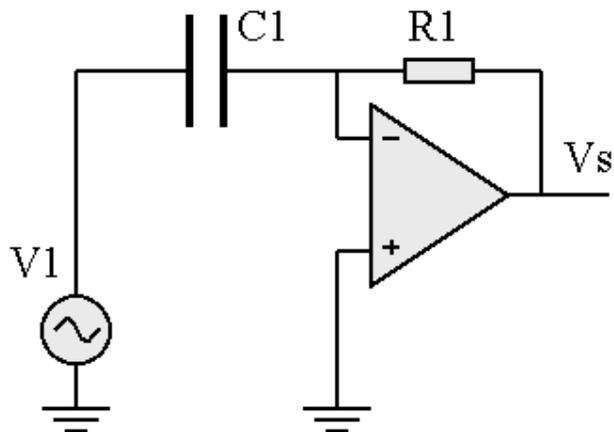
**Figura 3-5.** Amplificador inversor. La salida es  $V_S = -V_1 * R_2/R_1$ . Para minimizar el error de cero es conveniente hacer  $R_3$  igual a  $R_1$  y  $R_2$  en paralelo  $R_3 = R_1 * R_2 / (R_1 + R_2)$



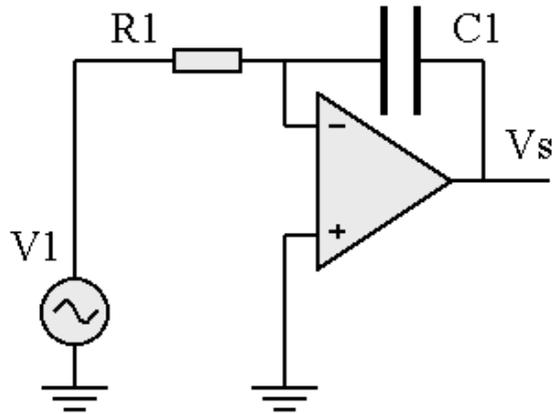
**Figura 3-6.** Amplificador no inversor. La salida es  $V_S = V_1 * R_2/R_1$



**Figura 3-7.** Montaje como seguidor o amplificador con ganancia 1, presenta una entrada a muy alta impedancia y salida a baja impedancia.

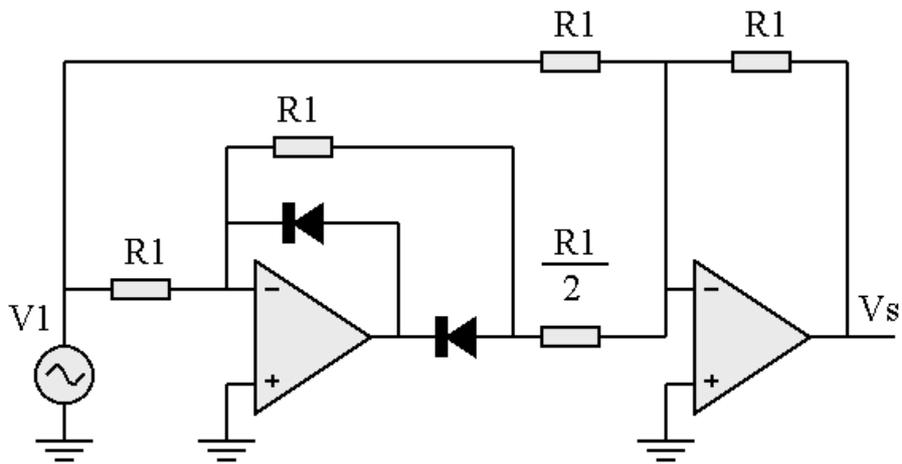


**Figura 3-8.** Amplificador derivador. La salida es la derivada temporal de la entrada:  
 $V_S = -1/(R_1 * C_1) dV_1/dt$

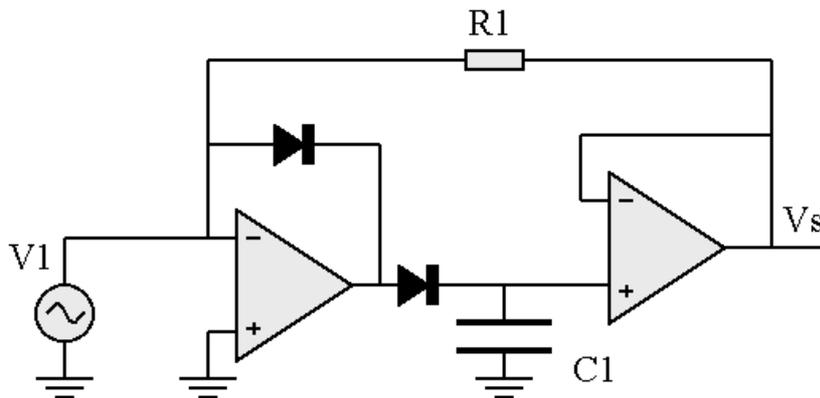


**Figura 3-9.** Amplificador integrador. La salida es la integral temporal de la tensión de entrada: Por razones de estabilidad a largo plazo es necesario disponer una resistencia R0 en paralelo con C1, esta resistencia debe ser tal que  $C1 * R0$  sea muy grande con respecto a los periodos de trabajo de la señal de entrada.

$$V_S = -1/(R_1 * C_1) \int V_1 dt.$$



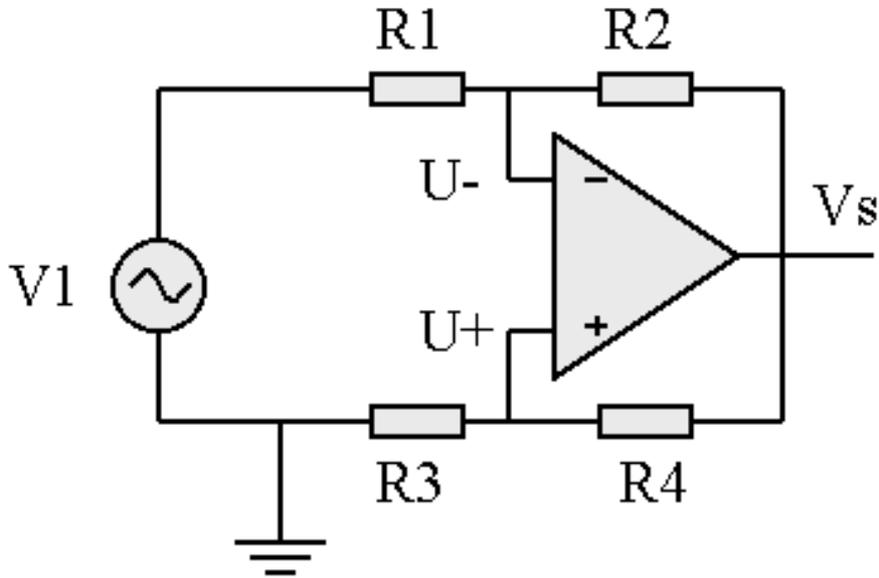
**Figura 3-10.** Rectificador doble onda. El amplificador IC1 compensa la falta de linealidad del diodo.



**Figura 3-11.** Detector de pico positivo. Debido a la presencia de los dos diodos, el condensador C1 se carga a la tensión de pico dada por el primer operacional y mantenida gracias al lazo (R1) de realimentación.

### Circuito con impedancia de entrada negativa

Este circuito se utiliza para aumentar el amortiguamiento de un geófono electromagnético por encima del amortiguamiento obtenido con la bobina cortocircuitada.



**Figura 3-12.** Montaje básico de un operacional que presenta una impedancia de entrada negativa.

La tensión en la entrada inversora viene dada por:

$$u^{-} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{e2} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_s$$

Teniendo presente la impedancia infinita en la entrada no inversora es:

$$\frac{U_{e1} - u^{+}}{R_3} = \frac{u^{+} - U_s}{R_4}$$

separando términos queda:

$$\frac{U_s}{R_4} + \frac{U_{e1}}{R_3} = \frac{R_3 + R_4}{R_3 R_4} u^{+}$$

suponiendo un amplificador operacional ideal  $u^{+} = u^{-}$

$$\frac{U_s}{R_4} + \frac{U_{e1}}{R_3} = \frac{R_3 + R_4}{R_3 R_4} \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{e2} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_s \right)$$

como en nuestro caso  $U_{e1}=0$

$$\frac{U_s}{R_4} = \frac{R_3 + R_4}{R_3 R_4} \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{e2} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_s \right)$$

de donde se puede obtener  $U_s$

$$U_s \left( \frac{1}{R_4} - \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2} \frac{R_1}{R_3 R_4} \right) = \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2} \frac{R_2}{R_3 R_4} U_{e2}$$

$$U_s = \frac{\left( \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2} \frac{R_2}{R_3 R_4} \right)}{\left( \frac{1}{R_4} - \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2} \frac{R_1}{R_3 R_4} \right)} U_{e2}$$

la corriente de entrada será:

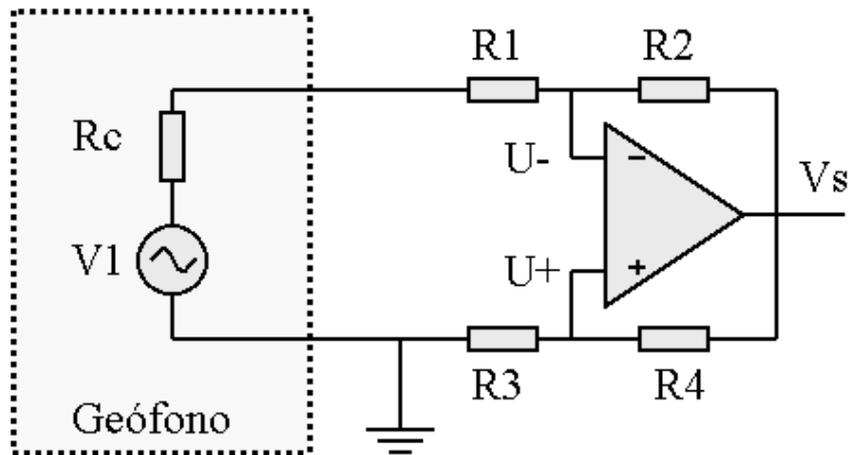
$$I_{e2} = \frac{U_{e2} - u^-}{R_1}$$

sustituyendo

$$I_{e2} = U_{e2} R_i =$$

$$U_{e2} \frac{1}{R_1} \left( 1 - \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{\left( \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2} \frac{R_2}{R_3 R_4} \right)}{\left( \frac{1}{R_4} - \frac{R_3 + R_4}{R_1 + R_2} \frac{R_1}{R_3 R_4} \right)} \right) \right)$$

Eligiendo convenientemente el valor de los componentes el circuito presenta impedancia de entrada negativa.

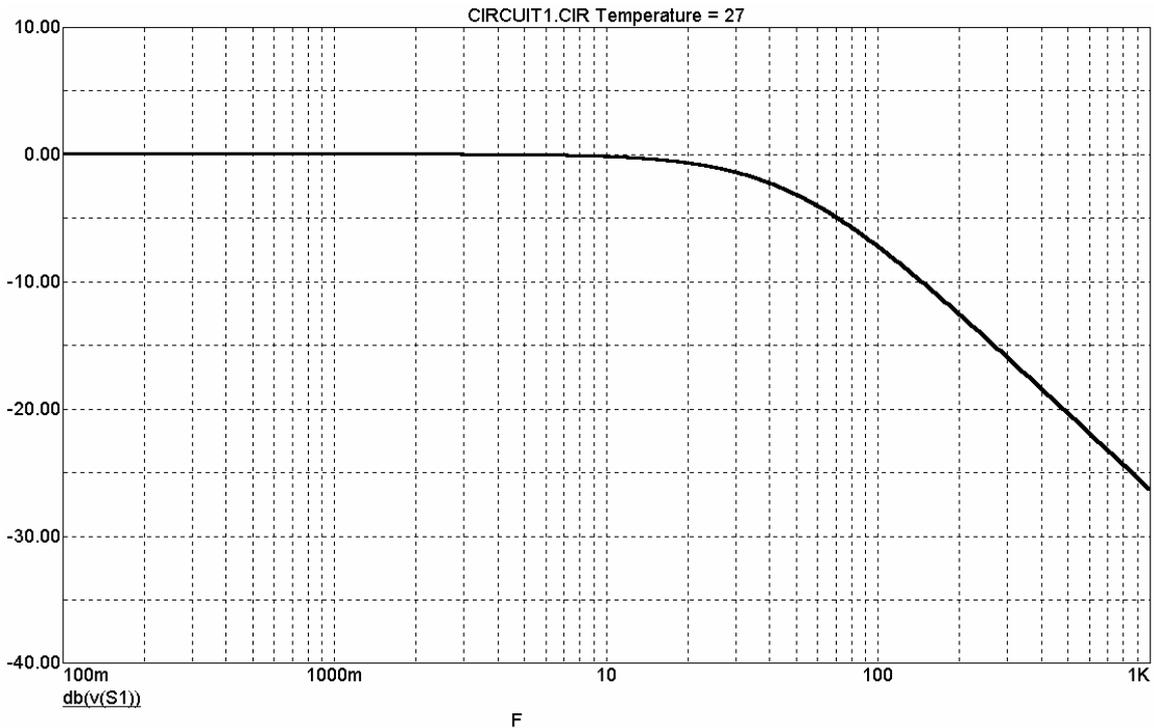


**Figura 3-13.** Conectando a la entrada un geófono con una bobina de resistencia  $R_c$ , el amortiguamiento corresponde a  $R_c - R_f$  es decir se alcanzan cifras superiores a las que se obtendrían cortocircuitando la bobina sensora.

### Filtros. Introducción

Un filtro es un dispositivo que modifica la respuesta en frecuencia (y en fase) de un instrumento. La inclusión de filtros en un instrumento es consecuencia de la necesidad de obtener una buena estabilidad y mejorar la relación señal / ruido cuando se trabaja con elevadas sensibilidades del instrumento. En muchos casos ya el propio sensor actúa como un filtro, en otros la respuesta del sensor es demasiado amplia y hay que reducirla a la zona del espectro que nos interesa. Finalmente, en algunos casos se debe incluir un filtro para eliminar señales indeseables. Los sistemas de filtros son quizá la parte más delicada de un instrumento, pues su capacidad de modificación de la señal es muy grande, llegando en muchos casos a falsear de tal modo la información que es muy difícil darse cuenta de que algo no funciona correctamente. Una historia muy divertida ocurrió en un experimento con estaciones sísmicas de diseño revolucionario que se desplegaron en un perfil por toda Europa, estas estaciones registraron unos extraños terremotos que fueron bautizados como *terremotos lentos*, pasados los años y con otros instrumentos se descubrió que estos *terremotos lentos* eran el resultado de una saturación del amplificador pero que el sistema de filtros transformaba en una señal de aspecto extraño pero que se podía asociar a un nuevo tipo de señal sísmica no conocida. Esta historia nos debe obligar a conocer exhaustivamente el sistema de filtros con el que se está trabajando. Aunque existen muchos tipos de filtros distintos, aquí sólo trataremos los filtros más utilizados en instrumentación electrónica. Todos los diseños presentados poseen un excelente comportamiento, especialmente teniendo presente la facilidad de diseño, el bajo costo de implementación y la utilización de componentes de uso común. La denominación de los distintos filtros se hace en función de la banda de frecuencias que dejan pasar. Así tenemos filtros *pasa-bajos* que sólo deja pasar señales con frecuencias inferiores a la frecuencia de corte, *pasa-altos* sólo frecuencias superiores a la de corte, *pasa banda* sólo en un entorno de una frecuencia central, *supresión de banda* no deja pasar las frecuencias en un entorno y *pasa-todo* sólo modifica las fases pero no las amplitudes. Un caso particular de este tipo de filtro es el filtro *anti-aliasing* que debemos incluir antes del conversor analógico digital para evitar

que lleguen a él señales con frecuencias superiores a la mitad de la frecuencia de muestreo.



**Figura 3-14.** Respuesta de un filtro RC pasa-bajos con  $R = 33 \text{ K}\Omega$  y  $C = 100 \text{ nF}$ .

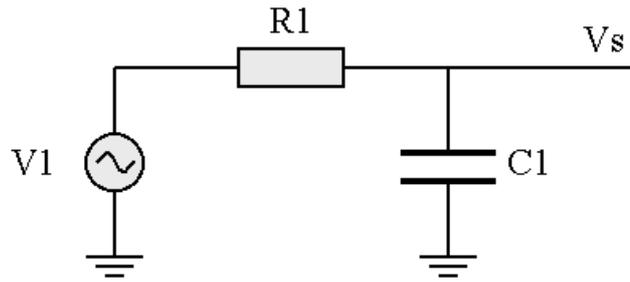
### Filtros pasivos

Los filtros pasivos generalmente más utilizados se basan en redes RC y sólo a frecuencias elevadas se utilizan inductancias. Ello es consecuencia del elevado costo, peso y volumen que de este tipo de componentes. La configuración básica de un filtro es la red RC que si se dispone la resistencia en serie y el condensador en paralelo se comporta como un filtro pasa-bajos, mientras que si el condensador está en serie y la resistencia en paralelo se tiene un filtro pasa-altos. Este tipo de filtro es muy sensible a las impedancias de salida de la fuente y de entrada de la carga, ya que ambas aparecen en serie y paralelo con el filtro. Estos filtros, aunque se utilizan habitualmente en muchos diseños, sólo son útiles cuando se trabaja en una zona alejada de las frecuencias de corte y además se puede permitir que la pendiente de la atenuación en la banda suprimida sea pequeña.

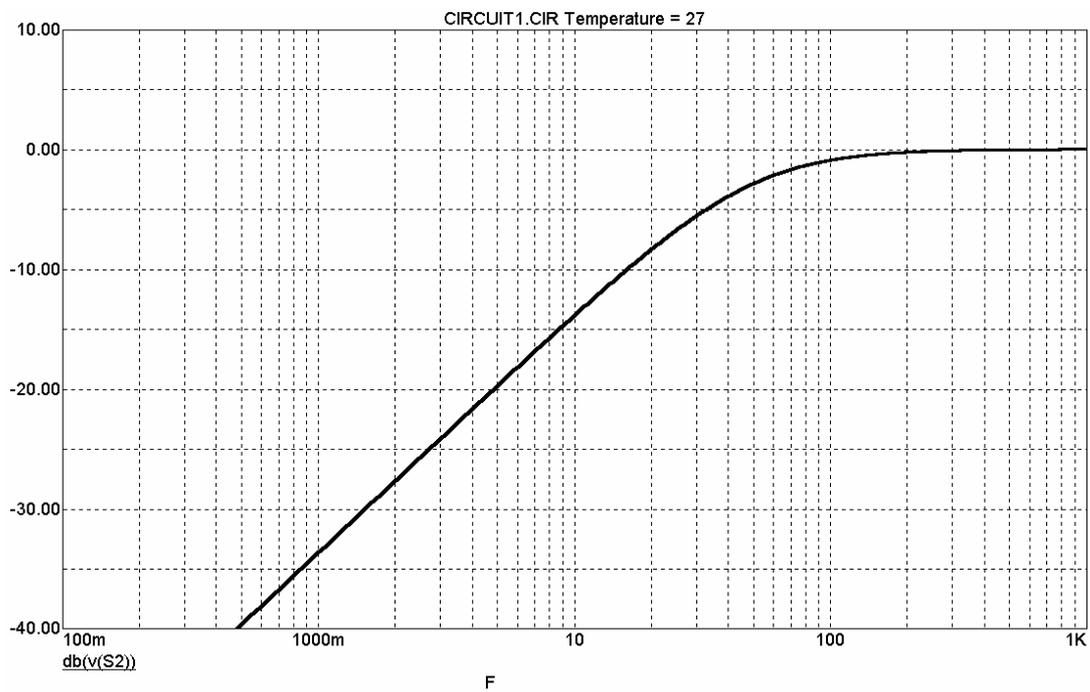
#### Filtros de primer orden. Filtro pasa-bajos RC

La función de transferencia es:

$$PB(s) = \frac{1}{RCs + 1}$$

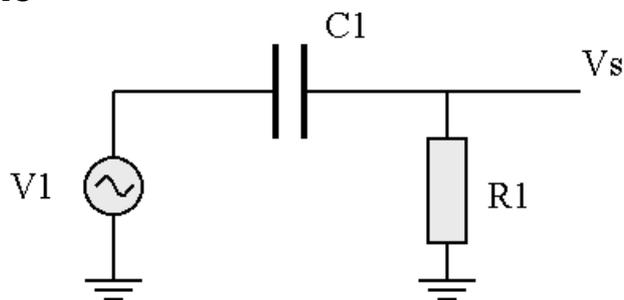


**Figura 3-15.** Filtro pasa-bajos realizado con una célula elemental RC



**Figura 3-16.** Respuesta de un filtro RC pasa-altos con  $R = 33 \text{ K}\Omega$  y  $C = 100 \text{ nF}$ .

### Filtro pasa-altos RC



**Figura 3-17.** Filtro pasa-altos realizado con una célula elemental RC

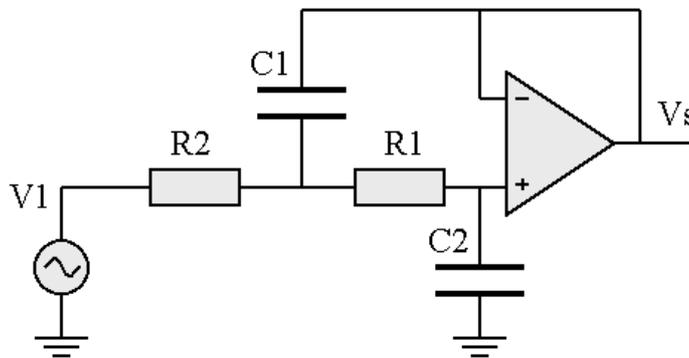
La función de transferencia es:

$$PA(s) = \frac{1}{\frac{1}{RCs} + 1} = \frac{RCs}{RCs + 1}$$

### Filtros activos

Con redes RC es imposible alcanzar valores grandes de atenuación y pendientes elevadas de corte. El empleo de autoinducciones sólo resulta en la práctica a altas frecuencias. Además, el cálculo de los distintos componentes es muy complejo, ya que no es posible realizar una separación adecuada en distintos bloques. La incorporación de elementos activos, especialmente de amplificadores operacionales simplifica el diseño de los filtros, permitiendo alcanzar pendientes elevadas y grandes atenuaciones. Sin embargo, no hay que descuidar evaluar la influencia del ruido generado en los distintos amplificadores. Los filtros activos más utilizados corresponden a la configuración de Sallen-Key. Esta configuración permite realizar filtros estables, con pocos componentes y fáciles de calcular. Además, son poco sensibles a las tolerancias y derivas que puedan presentar los componentes que intervienen. En general, debe seleccionarse un amplificador operacional que presente una muy elevada impedancia de entrada y que permita utilizar resistencias elevadas en la entrada.

### Filtro activo pasa-bajos de segundo orden



**Figura 3-18.** Filtro activo pasa-bajos con  $R = 33 \text{ K}\Omega$  y  $C = 100 \text{ nF}$ .

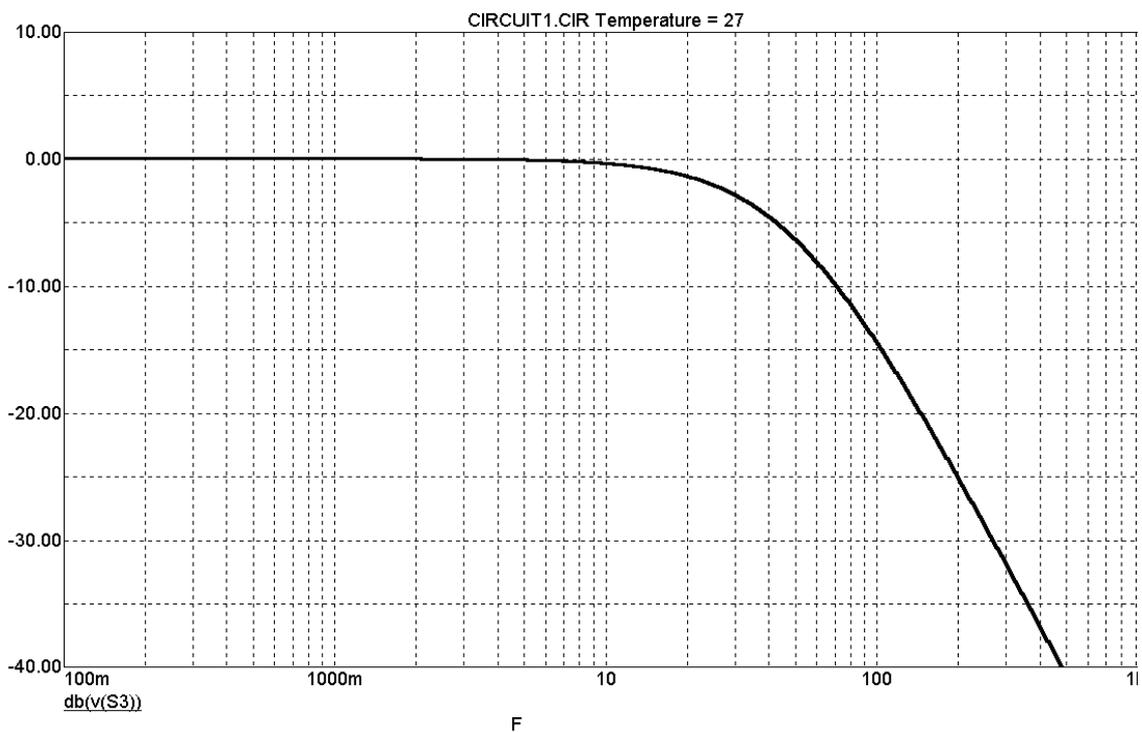
La función de transferencia es:

$$PB(s) = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \frac{1}{s^2 + s \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

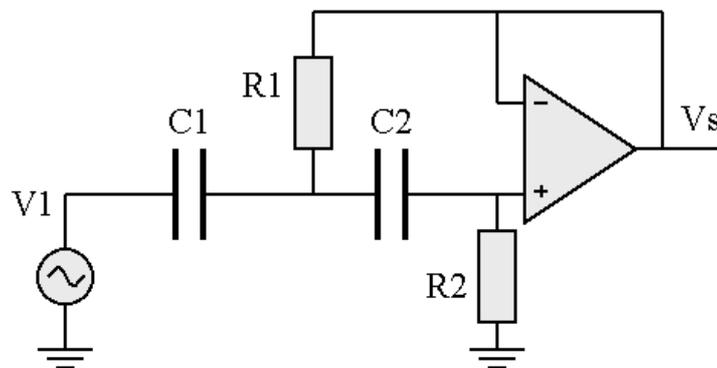
la frecuencia de corte es:  $f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}}$

El factor Q es:  $Q = \frac{R_1 + R_2}{2} \sqrt{\frac{C_1}{R_1 R_2 C_2}}$  para  $R_1 = R_2$  resulta

$$Q = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$$



**Figura 3-19.** Respuesta de un filtro pasa-bajos con  $R_1 = R_2 = 33 \text{ K}\Omega$  y  $C_1 = C_2 = 100 \text{ nF}$ . Atención escala de frecuencias de 0.01 Hz. a 1KHz.



**Figura 3-20.** Filtro activo pasa-altos con  $R = 33 \text{ K}\Omega$  y  $C = 100 \text{ nF}$ .

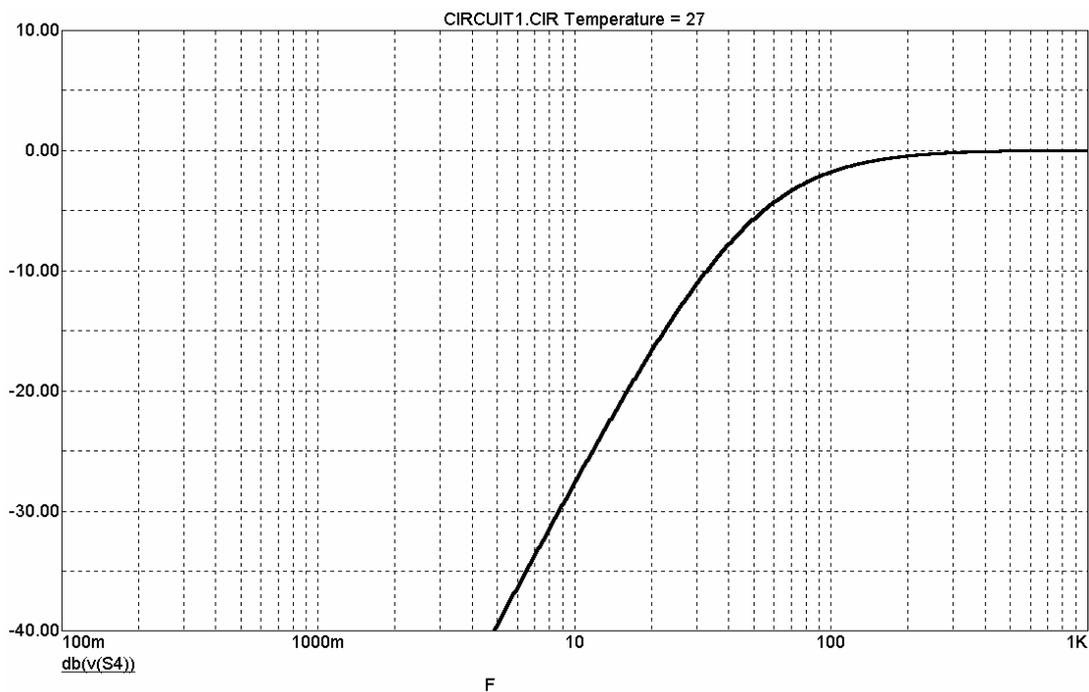
### Filtro activo pasa-altos de segundo orden

La función de transferencia es:

$$PA(s) = \frac{s^2}{s^2 + s \left( \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

la frecuencia de corte es:  $f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}}$

El factor Q es:  $Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_2 C_1}}{R_1 C_1 + R_1 C_2}$  para  $C_1 = C_2$  resulta  $Q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$

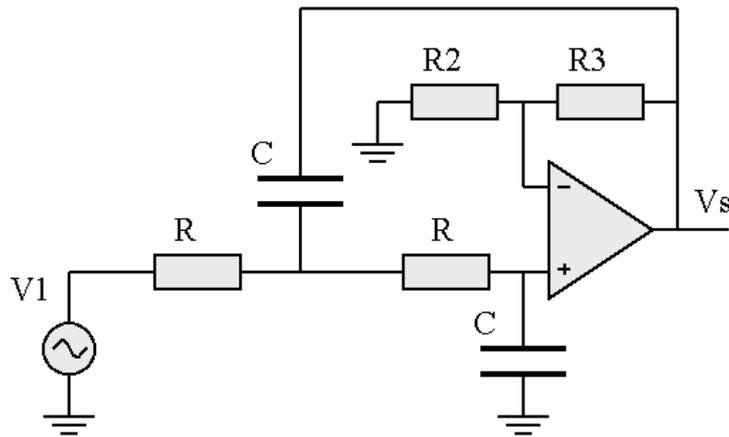


**Figura 3-21.** Respuesta de un filtro pasa-altos con  $R_1 = R_2 = 33 \text{ K}\Omega$  y  $C_1 = C_2 = 100 \text{ nF}$ . Atención escala de frecuencias de 0.01 Hz. a 1KHz.

### Filtros de orden elevado

Cuando se diseña un filtro con una elevada pendiente de corte como es un filtro *anti-aliasing* se precisa utilizar un filtro de elevado orden que se construye con varias secciones de segundo orden. La selección de los componentes con la configuración Sallen-Key es muy difícil, ya que hay que calcular todos los componentes para cada una de las secciones y seleccionar entre los disponibles en el mercado.

Para configuraciones con orden superior a 4 es preferible utilizar amplificadores de ganancia variable, incluyendo dos resistencias más. En esta configuración se pueden hacer todos los elementos que determinan la frecuencia de corte iguales para todas las secciones y sólo se deberá calcular para cada una de ellas la resistencia de realimentación que determina la ganancia. Un problema derivado de utilizar esta configuración es que el sistema de filtros presenta una cierta ganancia en continua que debe tenerse en cuenta. Para evitar saturaciones es importante que las secciones de menor Q se dispongan las más próximas a la entrada.



**Figura 3-18.** Filtro activo pasa-bajos con ganancia ajustable. R1 y R2 determinan la amplificación en continua (frecuencia  $\rightarrow 0$ ) del filtro

### Filtros de Butterworth

En sismología el sistema de filtros más utilizado es el que presenta una función de transferencia que se ajusta a un polinomio de Butterworth. Este filtro se caracteriza por presentar la máxima regularidad en la banda transmitida. La respuesta en frecuencia de un filtro de Butterworth se ajusta a los polinomios:

Orden	Polinomios de Butterworth normalizados
1	$(s + 1)$
2	$(s^2 + 1.414s + 1)$
3	$(s + 1)(s^2 + s + 1)$
4	$(s^2 + 0.765s + 1)(s^2 + 1.618s + 1)$
5	$(s + 1)(s^2 + 0.618s + 1)(s^2 + 1.618s + 1)$
6	$(s^2 + 0.518s + 1)(s^2 + 1.414s + 1)(s^2 + 1.932s + 1)$
7	$(s + 1)(s^2 + 0.455s + 1)(s^2 + 1.247s + 1)(s^2 + 1.802s + 1)$
8	$(s^2 + 0.390s + 1)(s^2 + 1.111s + 1)(s^2 + 1.663s + 1)(s^2 + 1.962s + 1)$

Para implementar un filtro de Butterworth, aunque es posible utilizar la configuración anterior, es preferible emplear amplificadores de ganancia variable. De este modo los elementos RC que determinan la frecuencia de corte del filtro son todos iguales, apareciendo el coeficiente del polinomio como la ganancia del amplificador. La función de transferencia es:

$$PBR(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + 2k\frac{s}{\omega_0} + 1}$$

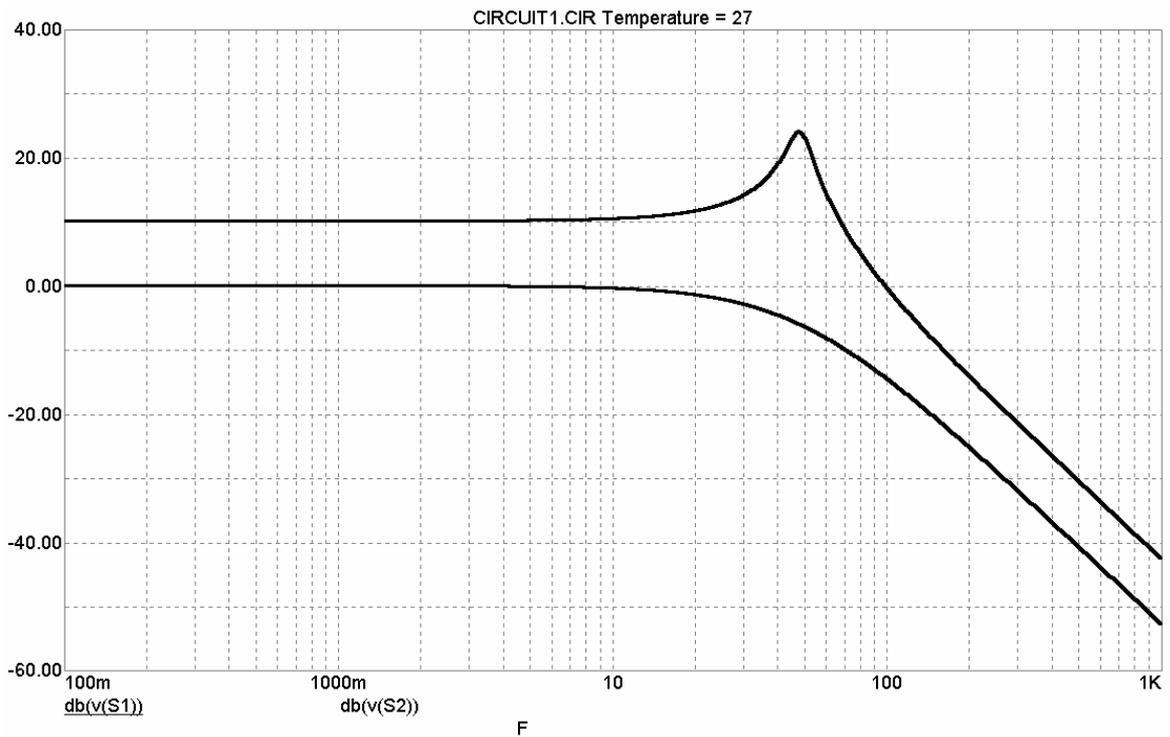
La frecuencia de corte es  $\omega_0 = 2\pi f_c = \frac{1}{RC}$

La constante k esta relacionada con la amplificación del circuito  $A = 3 - 2k$

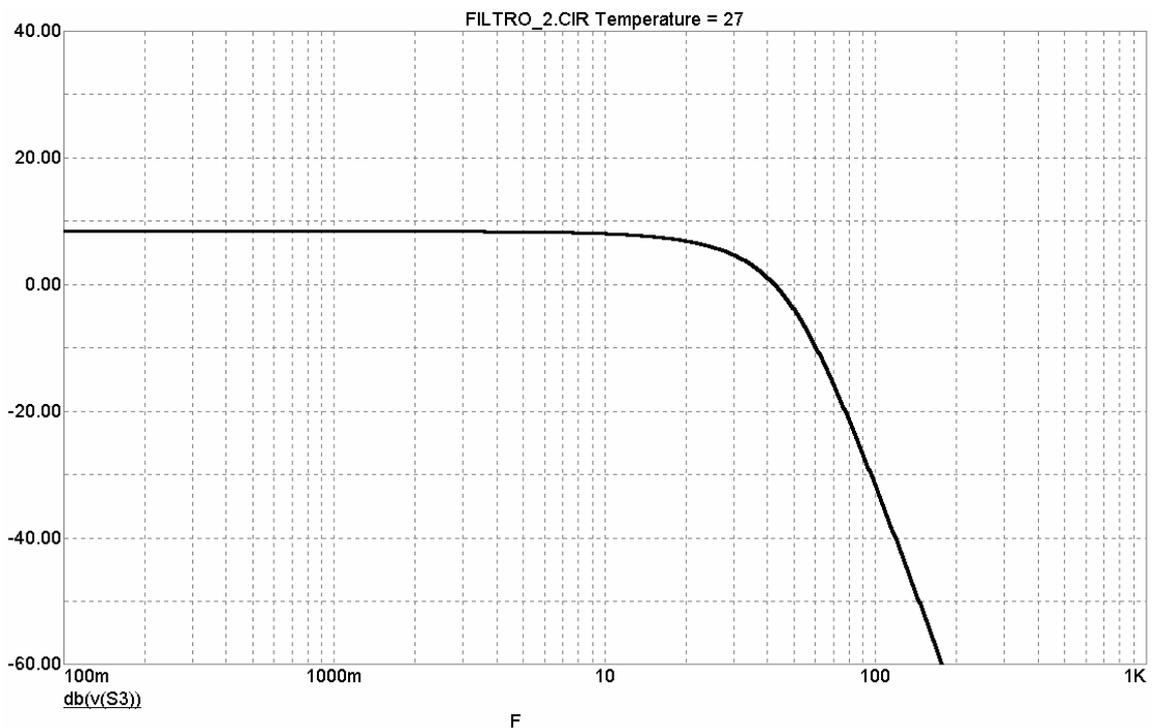
Por lo que las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  de acuerdo con  $\frac{R_1}{R_2} = 2(1 - k)$

Combinando varias células de este tipo se puede obtener un filtro de cualquier orden par. Si se desea un filtro de orden impar basta incluir un elemento RC. Para evitar la saturación de las etapas de mayor ganancia es conveniente disponerlas en orden creciente de ganancia.

Elementos para un filtro Butterworth de octavo orden y 48Hz de frecuencia de corte.					
Sección	R	C	R1	R2	2k
1	33 KΩ	100 nF	380 Ω	10 KΩ	1.962
2	33 KΩ	100 nF	3.3 KΩ	10 KΩ	1.67
3	33 KΩ	100 nF	8.8 KΩ	10 KΩ	1.12
4	33 KΩ	100 nF	16 KΩ	10 KΩ	0.4



**Figura 3-23.** Respuesta para un filtro pasa-bajos con ganancia. La frecuencia de corte se calcula en función de  $R = 33 \text{ K}\Omega$  y  $C = 100 \text{ nF}$ . La ganancia  $R1 = 22 \text{ K}\Omega$  y  $R2 = 10 \text{ K}\Omega$ . Como referencia se ha representado también la respuesta de un filtro Sallen-Key con  $R = 33 \text{ K}\Omega$  y  $C = 100 \text{ nF}$ .



**Figura 3-24.** Respuesta de un filtro Butterworth de octavo orden y 48Hz de frecuencia de corte.

### Diseño de un filtro anti-aliasing

Un dispositivo de conversión analógico digital debe contar con un filtro para evitar fenómenos de *aliasing*. Este evita la entrada de señales de frecuencias superiores a la mitad de la frecuencia de muestreo y que luego aparecen como señales de frecuencia más baja y contaminan el registro. Los mejores resultados se obtienen cuando la atenuación del filtro a la frecuencia de supresión debe ser mayor que la resolución del conversor. Es fácil diseñar un filtro para conversores de baja resolución, pero a medida que se aumenta la resolución del conversor se complica la estructura necesaria. Aunque hay programas de cálculo específicos para determinar el filtro óptimo para cada aplicación, es necesario conocer el fundamento del método para poder optimizar el diseño global del sistema. Como ejemplo se ha utilizado el programa Filter-Lab de Microchip Technology específico para el diseño de filtros pasa-bajos y con una utilidad directa para la optimización de filtros anti-alias. Con ayuda de este programa se han estimado los filtros necesarios para trabajar con conversores analógico digitales de 12, 16 y 20 bits, operando todos ellos a 50 muestras por segundo y con frecuencia de corte de 7 Hz. La tabla recoge los resultados obtenidos utilizando filtros con respuesta Butterworth y Chebyshev.

Resolución conversor	Atenuación requerida	Butterworth		Chebyshev		
		N de polos	Atenuación	n. polos	Atenúa.	Rizado
12 bits	74 dB	7	77.4	5	78	3
16 bits	98 dB	9	79	7	99	3
20 bits	122 dB	-	-	8	120	3

Obsérvese que para conversores de muy alta resolución sólo son viables los filtros de Chebyshev, a pesar de que introducen un fuerte rizado en la banda transmitida. Una solución es aumentar la frecuencia de muestreo y reducir posteriormente los datos mediante filtrado digital.

### Resolución de un conversor

El nivel aceptable para las señales de frecuencia superiores a la frecuencia de supresión debe ser menor a la resolución del conversor que es de un bit. Para el diseño del filtro antialias es posible asignar la atenuación del filtro a la resolución del conversor en decibelios referidos a un bit.

$$ADC = 20 \log \left( \frac{1}{2^{n-1}} \right)$$

donde n es el número de bits del conversor. Se considera que el conversor trabaja en modo bipolar, por consiguiente la escala es signo y n-1 bits.

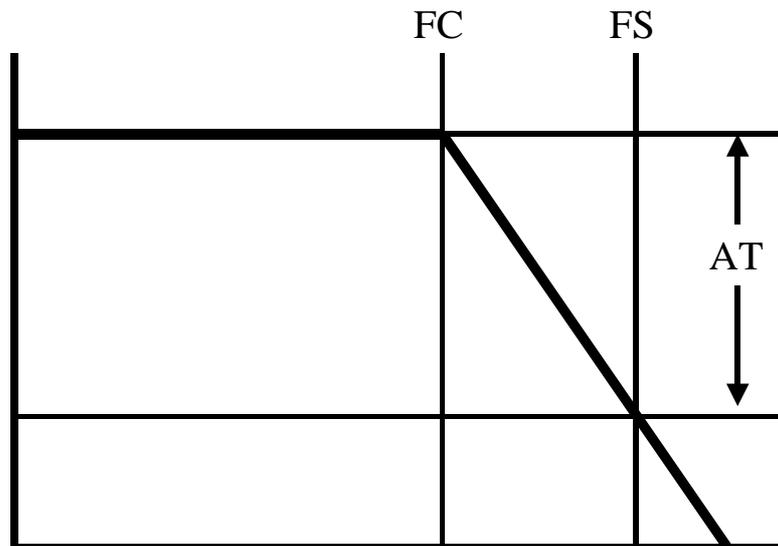
Bits ADC	Atenuación
12	-66 dB
16	-90 dB
20	-114 dB
24	-138 dB

## Diseño del filtro

Los valores de atenuación del filtro a la frecuencia de corte requeridos para los conversores de alta resolución son muy grandes. Para obtenerlos se deberá utilizar necesariamente un filtro complejo con un elevado número de polos, especialmente si se quiere extender el rango de frecuencias sin atenuar hasta valores cercanos a la frecuencia de corte. Una solución alternativa es utilizar un filtro analógico más suave y una frecuencia de muestreo muy elevada, reduciendo mediante un filtro digital la cadencia de muestreo hasta el valor deseado. De esta forma se simplifica la parte analógica del diseño, pero se aumentan los requerimientos del sistema digital en cuanto capacidad de cálculo y memoria. En sistemas que deban operar con limitaciones de energía, como son las estaciones remotas situadas sobre el volcán, no es posible utilizar microcomputadores con suficiente potencia de cálculo, por lo que es preferible filtrar la señal antes de la conversión. El orden requerido para el filtro antialias puede calcularse fácilmente partiendo de las correspondientes funciones de transferencia. En general utilizaremos un filtro Butterworth, ya que son los que mejores características presentan en la banda transmitida. Recordemos que un filtro pasa-bajos de Butterworth es aquel que responde a una función de transferencia de la forma:

$$B(s) = \frac{1}{P(s)}$$

donde  $P(s)$  es un polinomio de Butterworth.



**Figura 3-25.** Plantilla para el diseño de un filtro antialias. Es necesario definir la frecuencia de corte (FC) y la frecuencia de supresión (FS). La atenuación (AT) de la señal entre ambas frecuencias deberá ser superior a la resolución del conversor.

Orden	Polinomios de Butterworth normalizados
1	$(s + 1)$
2	$(s^2 + 1.414s + 1)$
3	$(s + 1)(s^2 + s + 1)$
4	$(s^2 + 0.765s + 1)(s^2 + 1.618s + 1)$
5	$(s + 1)(s^2 + 0.618s + 1)(s^2 + 1.618s + 1)$

6	$(s^2 + 0.518s + 1) (s^2 + 1.414s + 1) (s^2 + 1.932s + 1)$
7	$(s + 1) (s^2 + 0.455s + 1) (s^2 + 1.247s + 1) (s^2 + 1.802s + 1)$
8	$(s^2 + 0.390s + 1) (s^2 + 1.111s + 1) (s^2 + 1.663s + 1) (s^2 + 1.962s + 1)$

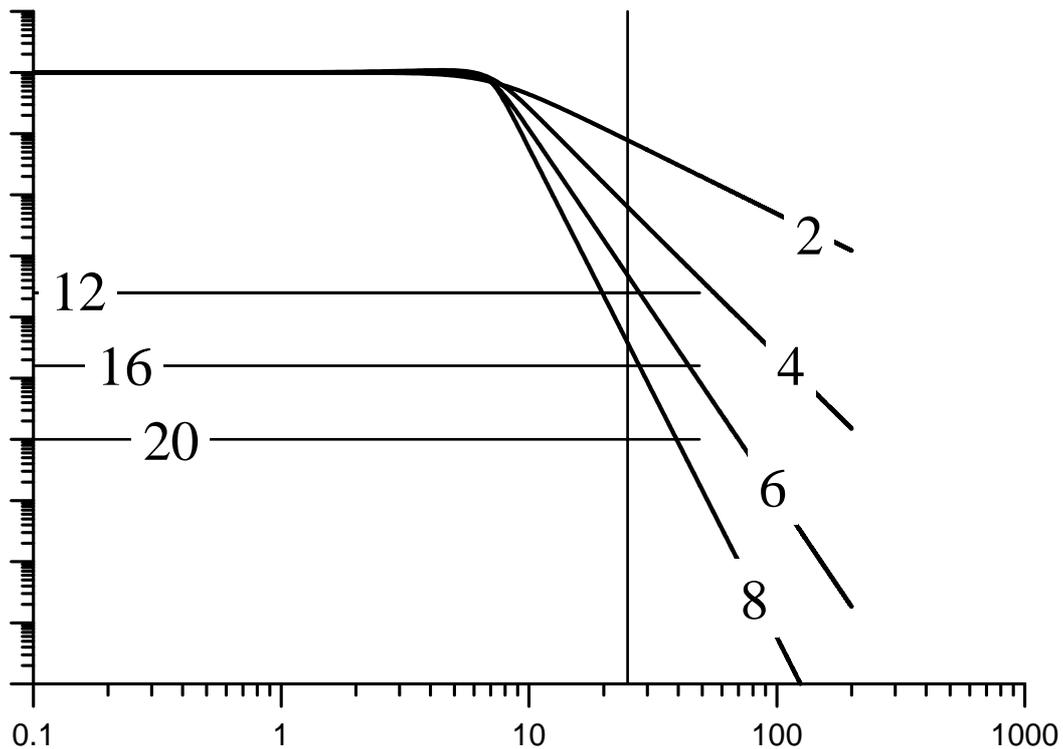
El cálculo de la atenuación se obtiene evaluando la función de transferencia a una frecuencia muy baja (valor en banda transmitida) y a la frecuencia de supresión (mitad de la frecuencia de muestreo). Téngase presente que la variable  $s$  de la función de transferencia es la pulsación compleja:

$$s = 2 \pi f_0 \sqrt{-1}$$

siendo  $f_0$  la frecuencia. La atenuación vendrá dada por:

$$dB = 20 \log \left( \frac{|T(s_c)|}{|T(s_0)|} \right)$$

donde  $T(s)$  es la función de transferencia calculada para la frecuencia de corte ( $s_c$ ) y para la banda transmitida ( $s_0$ ).



**Figura 3-26.** Respuesta de filtros Butterworth con frecuencia de corte de 7 Hz y orden: 2, 4, 6 y 8. La línea vertical corresponde a 25 Hz.

La siguiente tabla recoge los valores calculados para filtros Butterworth de distinto orden:

Frecuencia de muestreo 50 Hz. Frecuencia de corte 7 Hz.
---

Orden del filtro	1	2	3	4	5	6	7	8
Atenuación (a 25 Hz)	11dB	22dB	33dB	43dB	55dB	66dB	77dB	88dB

Otra forma posible para determinar la atenuación de un filtro es acudir directamente a la representación gráfica de la respuesta del filtro. El análisis anterior nos pone de manifiesto que deberemos utilizar filtros de orden muy elevado para evitar efectos de aliasing en los sistemas de adquisición de datos.

### Diseño de un filtro anti-aliasing para un convertor delta sigma

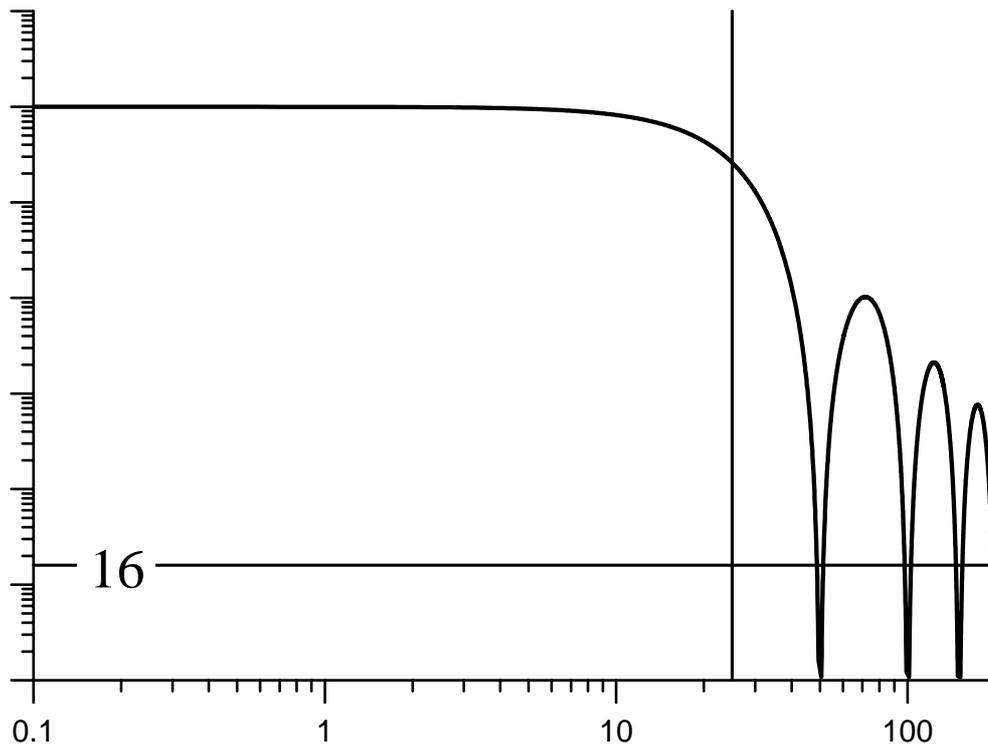
Los convertidores delta sigma utilizan una frecuencia de muestreo muy alta, que después reducen mediante un filtro digital de promedio al valor deseado de trabajo del sistema. Estos convertidores presentan una respuesta en frecuencia que es consecuencia del filtro digital utilizado para reducir la tasa de muestreo. Frecuentemente se cae en el error de creer que este filtro es suficiente para limitar la respuesta en frecuencia del sistema y que basta con disponer un pequeño filtro pasa-bajos constituido por una resistencia y un condensador. Sin embargo la sensibilidad de estos convertidores es muy elevada y el filtro deberá presentar una atenuación superior a 90 dB si trabajamos con 16 bits de resolución y de 114 dB para 20 bits. El filtro digital incorporado presenta una respuesta del tipo  $\text{sen}(x)^3/x^3$ . Para un convertor ADS1210 es:

$$|H(s)| = \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi f N}{f_{MOD}}\right)}{N \sin\left(\frac{\pi f}{f_{MOD}}\right)} \right|^3$$

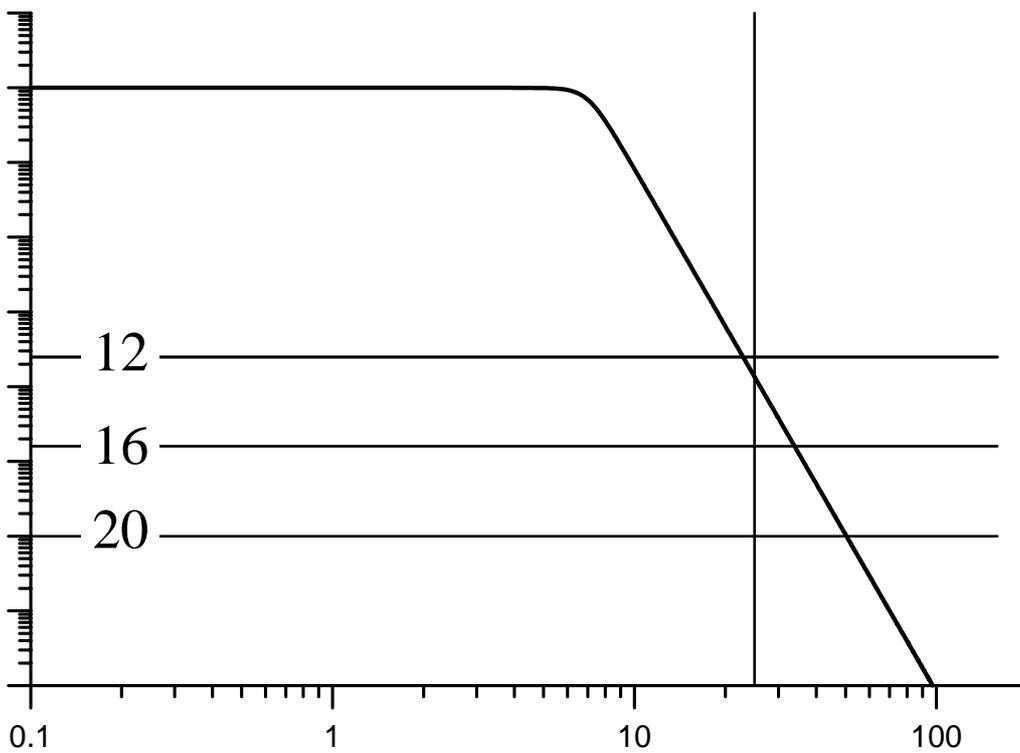
donde  $N$  es la constante de reducción de datos,  $f_{MOD}$  la frecuencia de muestreo y  $f$  la frecuencia. Para un ADS1210 trabajando con un cristal de 10 MHz y una frecuencia de muestreo de 50 Hz,  $N$  tiene un valor de 390 y para  $f_{MOD}$  se tiene 1000000/512. De acuerdo con esto, la atenuación a 25 Hz es:

$$dB = 20 \log \frac{|H(0.1)|}{|H(25)|}$$

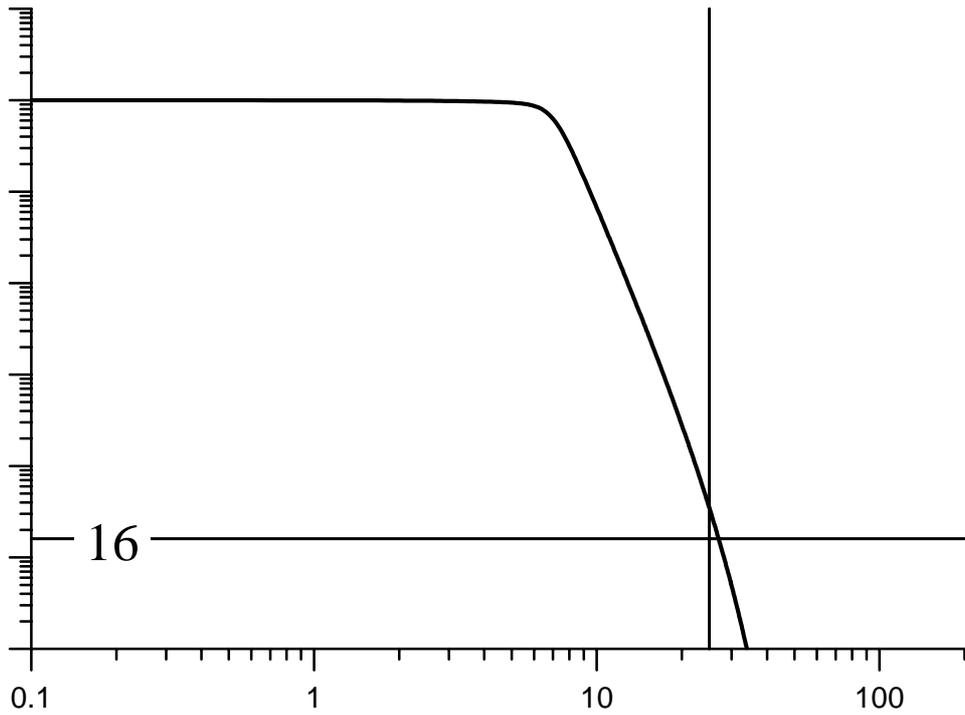
obteniéndose una atenuación de sólo 12 dB. Para alcanzar los niveles de atenuación requeridos deberemos incorporar un filtro pasa-bajos analógico de 7 polos, que para una frecuencia de corte de 7 Hz presenta una atenuación a 25 Hz de 59 dB. La atenuación total, filtro analógico y filtro digital incorporado será  $12 + 59 = 71$  dB.



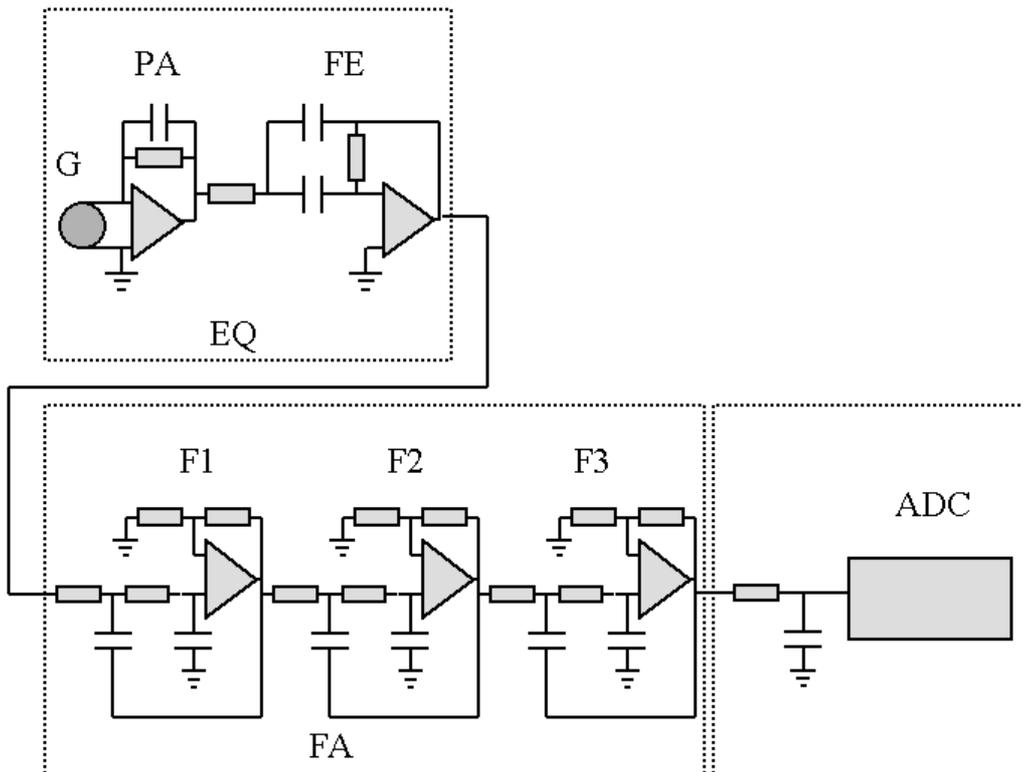
**Figura 3-27.** Respuesta en frecuencia de un conversor delta-sigma ADS1210 operando a 50 Hz.. Obsérvese como a frecuencias superiores a la frecuencia de muestreo el filtro todavía deja pasar señal. Como referencia, se han trazado las atenuaciones requeridas para 12, 16 y 20 bits.



**Figura 3-28.** Respuesta de un filtro Butterworth de 7 Hz y orden 6. Se muestran los niveles requeridos para 12, 16 y 20 bits.



**Figura 3-29.** Respuesta final del sistema compuesto por un filtro Butterworth de orden 7 seguido del filtro digital incorporado en el convertor delta-sigma.



**Figura 3-30.** Implementación de un filtro anti-alias en un sistema de registro sísmico con un convertor analógico digital de tecnología delta-sigma. En el presente diseño se utiliza un geófono (G) de 4.5 Hz con un circuito de expansión de respuesta formado por un preamplificador de bajo ruido (EQ) y el filtro de ecualización (FE). El filtro anti-alias es de siete polos, con tres filtros de ganancia variable de dos polos (F1, F2, F3) y un filtro RC en la red de entrada del convertor analógico digital (ADC). Los cuatro

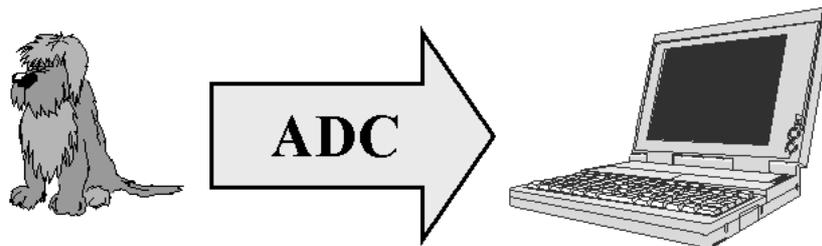
amplificadores operacionales (FE, F1, F2, F3) son un único circuito integrado de bajo ruido y alta impedancia de entrada como el TL074 (TL064 en versiones de bajo consumo).

En muchos casos es posible utilizar filtros con menor atenuación, pero siempre se estará sujeto a que señales con elevado contenido en alta frecuencia provoquen efectos de aliasing. Un buen conocimiento sobre el contenido espectral de las señales a registrar y sobre la respuesta del sensor permiten optimizar el diseño del filtro.

# SISTEMAS DE CONVERSIÓN ANALÓGICA DIGITAL

## Introducción

La utilización de un ordenador en un sistema de medida pasa necesariamente por la conversión de la señal analógica procedente de los sensores a una señal digital capaz de poder ser entendida por el ordenador. A este proceso se le conoce como Conversión Analógica Digital (ADC).



**Figura 4-1.** Cuando se desea pasar información a un computador se necesita un conversor analógico digital.

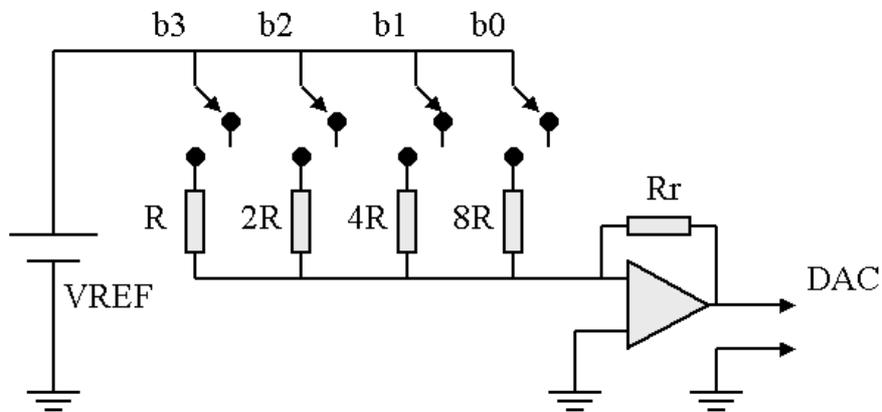
Por el contrario, en muchos sistemas de regulación se precisa de una señal analógica de control y para ello se debe realizar el proceso inverso: convertir la señal digital, obtenida con el ordenador a una señal analógica mediante un dispositivo de Conversión Digital Analógica (DAC). Existen muchos diseños para realizar un circuito de conversión analógica digital o viceversa. En general se utilizan circuitos integrados que realizan estas funciones directamente o con un mínimo de circuitería periférica. Sin embargo, no todos son aptos para una aplicación concreta y por ello deben estudiarse cuidadosamente sus características y elegir el que mejor se adapte a nuestras necesidades. La precisión y la velocidad de muestreo son los más evidentes, pero la simplicidad del diseño, la estabilidad frente a condiciones adversas y el consumo suelen ser muchas veces las cualidades que condicionan todo el diseño. El coste es otro factor a tener en cuenta, en general es posible disponer de circuitos ampliamente utilizados en la industria a un precio muy razonable.

## Conversión digital analógico

Un convertidor digital analógico es un dispositivo que genera una señal (en corriente o en tensión) proporcional a la palabra digital presente en sus entradas. El convertidor digital analógico más sencillo que se puede concebir consta simplemente de una tensión de referencia y de un conjunto de resistencias que entran en circuito en función de que su correspondiente interruptor este conectado o no. La tensión de salida del amplificador operacional viene dada por:

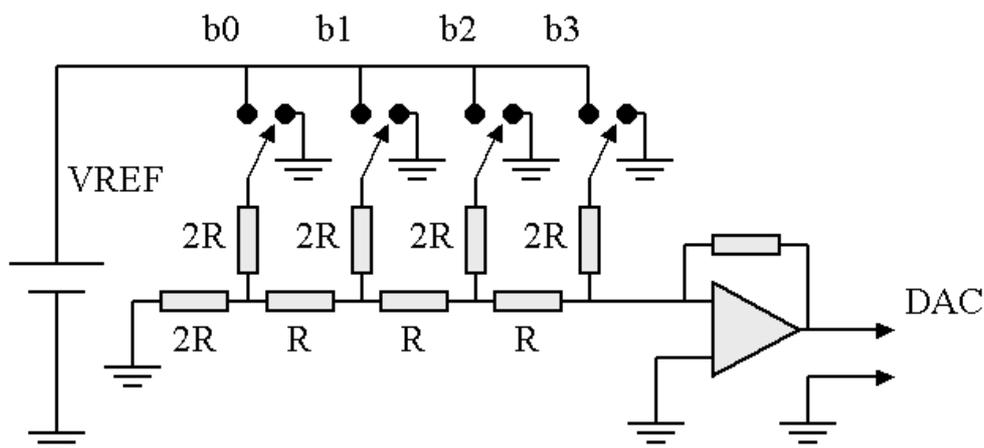
$$V_0 = V_{REF} \left( \frac{B_0}{8R} + \frac{B_1}{4R} + \frac{B_2}{2R} + \frac{B_4}{R} \right) Rr$$

donde  $V_o$  es la tensión de salida de operacional,  $V_{Ref}$  es la tensión de referencia y  $R_r$  la resistencia de realimentación del amplificador operacional.  $S_0, S_1, S_2, S_3$  son los valores lógicos (0 o 1) de los correspondientes bits.



**Figura 4-1.** La figura presenta un convertor digital analógico de 4 bits realizado con un amplificador operacional y cuatro resistencias.

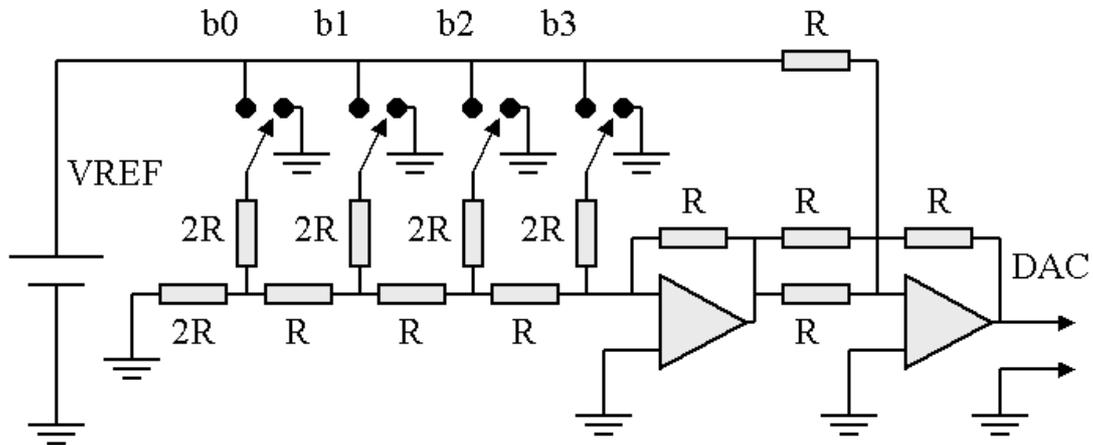
La realización de un convertor con esta tecnología requiere sólo disponer de un conjunto de resistencias de precisión de valores  $R, 2R, 4R, \dots 2^n R$ . Este requerimiento es muy difícil de conseguir cuando el número de bits aumenta. En realizaciones pequeñas se suele acudir a acoplar en paralelo (o serie) grupos de resistencias iguales. Una astucia permite realizar convertidores digital analógicos de alta resolución con sólo dos conjuntos de resistencias de precisión de valores  $R$  y  $2R$ , como todas las resistencias son iguales, el conjunto es mucho más fácil de producir industrialmente. Para ello se utiliza un circuito derivado del anterior con una red de resistencias  $R-2R$  a la entrada del amplificador operacional.



**Figura 4-3.** La figura presenta un convertor digital analógico de 4 bits realizado con un amplificador operacional y una red de resistencias  $R-2R$ .

La mayoría de los convertidores digital analógico (y analógico digital) trabajan con este dispositivo. La precisión de las distintas resistencias y su variación con la temperatura limitan este tipo de convertidores a resoluciones por debajo de 16 bits.

En general, los conversores digital analógico suelen ser por diseño unipolares. Para su utilización como dispositivos bipolares se desplaza la tensión de salida mediante un segundo amplificador operacional y una corriente auxiliar derivada de la propia tensión de referencia.



**Figura 4-4.** Conversor digital analógico de 4 bits bipolar con red de resistencias R-2R.

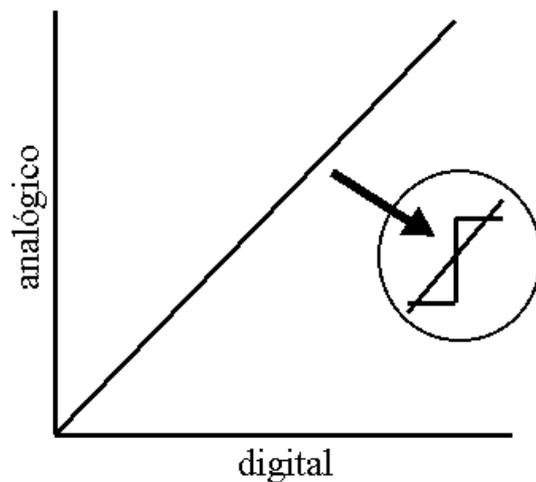
La utilización practica de cada uno de ellos depende del tipo seleccionado, debiéndose respetar escrupulosamente las condiciones de diseño. Una precaución a tener en cuenta es la estabilidad de la tensión de referencia, especialmente su variación con la temperatura o el envejecimiento. Hay que tener presente que para un simple conversor de 12 bits la estabilidad de la referencia debe ser mejor de  $2^{-12}$ .

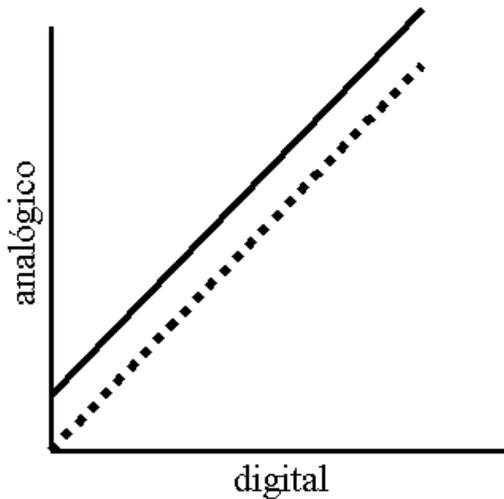
### Errores de digitalización

Las cualidades de un conversor digital analógico se expresan en función de sus discrepancias con el comportamiento que debería presentar un conversor digital analógico ideal:

**Figura 4-5.** Error de cuantificación

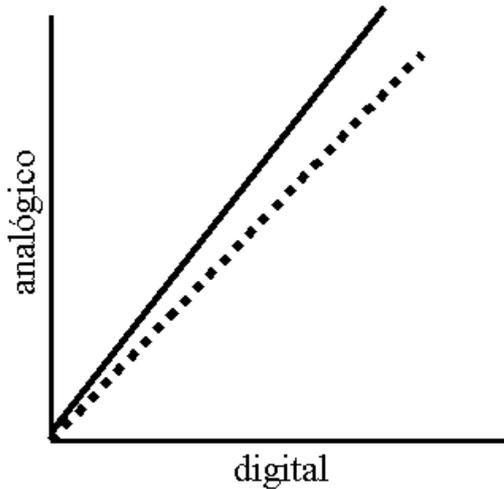
En un conversor digital analógico ideal la relación entre la entrada digital (números) y la salida analógica (voltios) es lineal. La resolución es igual al incremento más pequeño que puede experimentar la señal digital que es igual al cambio del bit menos significativo. El error es siempre menor a 1 bit menos significativo.





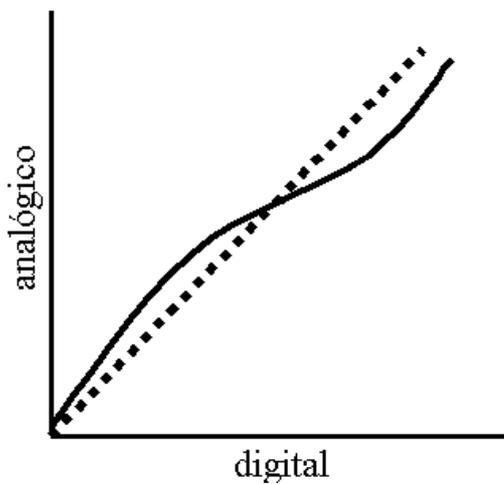
**Figura 4-6.** Error de cero (offset)

En un conversor digital analógico real la señal analógica está desplazada con respecto al valor que le correspondería en el conversor ideal. Este desplazamiento equivale a que para una entrada digital igual a cero se tiene un valor de la tensión de salida del conversor (error de cero). En general, puede compensarse mediante las técnicas habituales aplicadas a los amplificadores operacionales. Es importante destacar que el offset varía notablemente con la temperatura.



**Figura 4-7.** Error de amplificación

La discrepancia entre la salida real y la salida teórica aumenta con el valor de la entrada. Ello se debe a que la red de resistencias de los amplificadores operacionales de salida no está bien ajustada. Este error es fácilmente corregible y todos los circuitos de conversión digital analógica presentan estas resistencias accesibles desde el exterior. Otra causa de este error es la fuente de la tensión de referencia, la cual debe ajustarse con sumo cuidado.

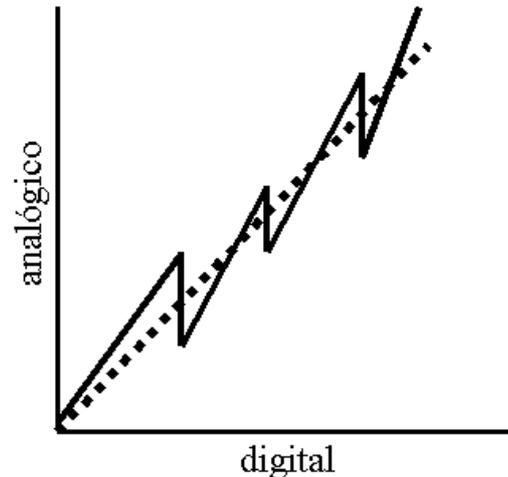


**Figura 4-8.** Error de linealidad

La relación entre la señal digital y la señal analógica discrepa ligeramente de la dependencia lineal que deberían presentar. Se debe a pequeñas discrepancias entre los valores de las distintas resistencias que componen la red R-2R. En general un mismo fabricante suministra un mismo tipo de conversor con distintas precisiones en linealidad. Sólo se puede compensar por software.

**Figura 4-9.** Error de monotonicidad

A una señal creciente en la entrada digital no siempre le corresponde una señal de salida creciente. Este error se debe a desajustes en la red R-2R y no se puede corregir. Es especialmente acusado en las series económicas de los convertidores de alta resolución. En general son dispositivos de muchos bits pero en los que sólo los más significativos están correctamente ajustados. A esto debemos añadir la dependencia de la temperatura de estas características. Otros factores importantes al seleccionar un determinado tipo de convertidor es la velocidad máxima de operación y el requerimiento energético de todo el sistema.



Al seleccionar un adecuado convertidor digital analógico se deben tener presente los márgenes que presentan estos errores, teniendo en cuenta que la información dada por el fabricante corresponde a datos de laboratorio y en la práctica se presentan valores ligeramente superiores. Hay que tener presente que la precisión de un convertidor analógico digital ideal es de +/-1 bit menos significativo lo que exige precisiones superiores al 0.05% para un convertidor de 12 bits en todos los componentes.

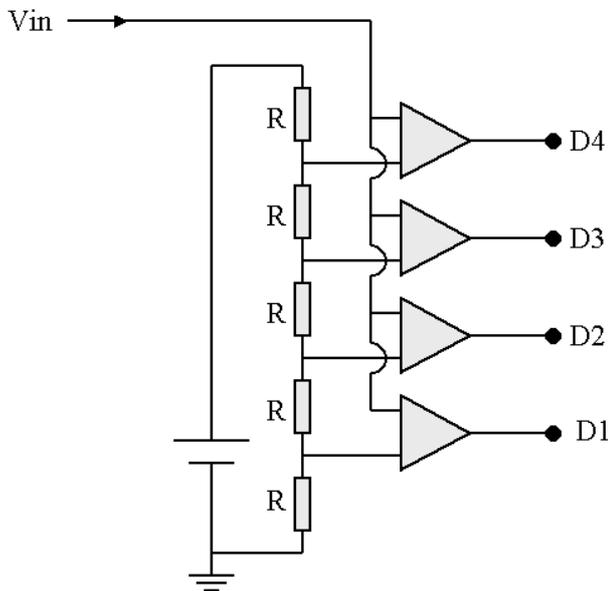
### **Conversión analógico digital (ADC)**

El convertidor analógico digital es el componente básico para que un ordenador pueda realizar la medida de la señal eléctrica analógica suministrada por el elemento sensor. Estos elementos pasan de una señal que varía continuamente a una señal que lo hace a saltos (resolución) y sólo cada cierto tiempo (muestreo). Las distintas limitaciones que presenta un determinado tipo de convertidor analógico digital son las mismas ya definidas al tratar los convertidores digital analógico. Sin embargo la falta de monotonicidad se suele denominar en este caso como pérdida de código (*missing code*).

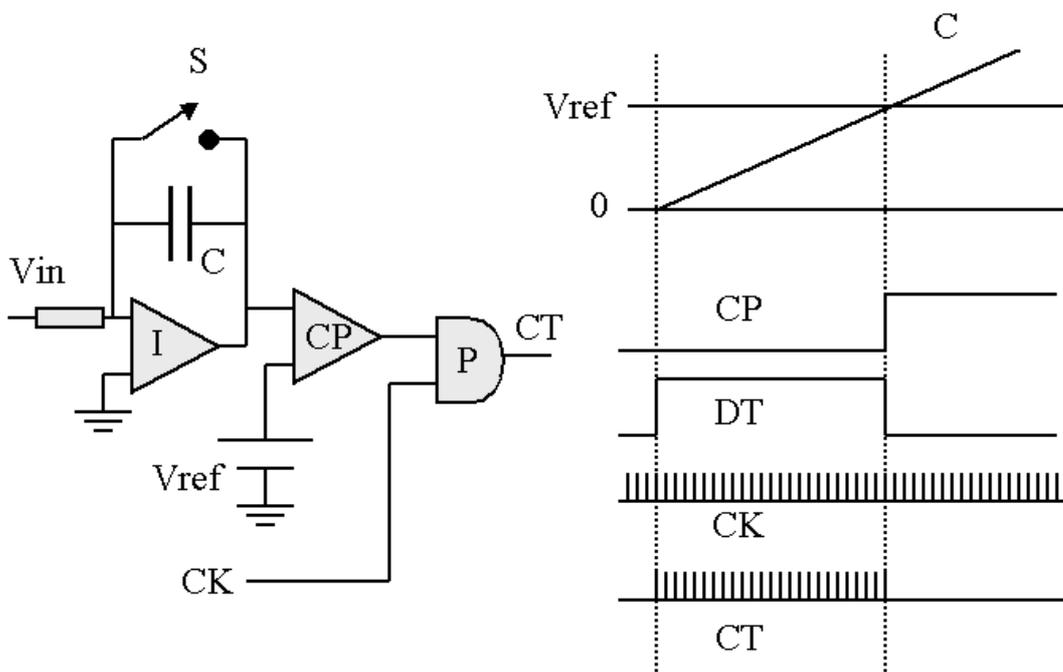
El convertidor analógico digital más sencillo consiste en una serie de circuitos comparadores ajustados cada uno de ellos a niveles de tensión de referencia sucesivamente cada vez más elevado, obtenidos mediante un divisor resistivo de una misma fuente de alta estabilidad. Al aplicar una tensión a la entrada del convertidor, conmutan todos aquellos convertidores cuya tensión de referencia sea menor que la entrada. Un circuito lógico codifica la salida de los comparadores en un número en el formato binario deseado. La gran velocidad de muestreo y la cualidad de que la conversión se realiza con un sólo pulso de reloj, hace que a este tipo de convertidores se les conozca como *convertidores flash*.

El elevado número de comparadores que se precisan para realizar un convertidor de este tipo hace que sólo existan en catálogo unos pocos circuitos de este tipo, todos ellos de poca resolución (8 bits). La elevada velocidad de conversión (>10MHz) que puede alcanzarse con ellos les hace aptos para el procesado digital de señales de alta

frecuencia, como el radar o el vídeo digital. En geofísica, este tipo de conversores sólo se utiliza en las técnicas de georadar. Los indicadores de nivel en escala logarítmica que equipan muchos instrumentos son conversores de este tipo con 16 comparadores distribuidos en una escala logarítmica de niveles sucesivos.



**Figura 4-10.** Conversor analógico digital de 4 niveles por comparación directa de la señal de entrada con cuatro tensiones de referencia obtenidas mediante un divisor resistivo.

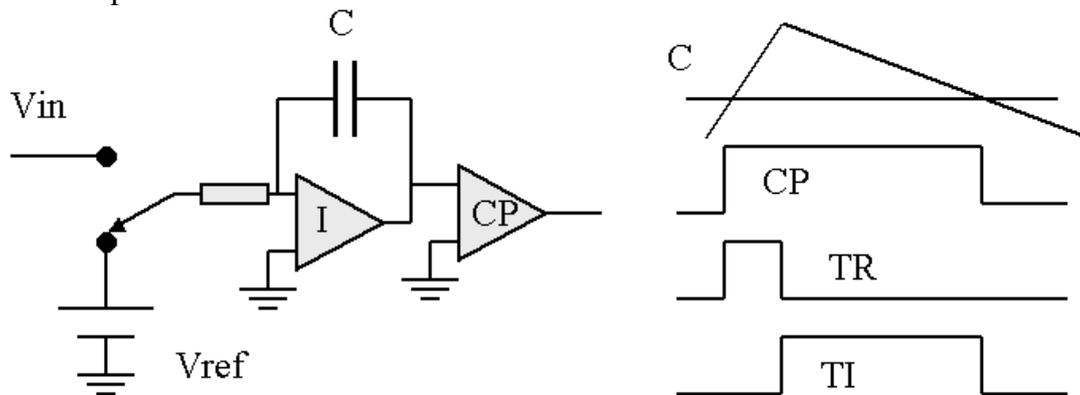


**Figura 4-11.** Conversor analógico digital de integración: consiste en medir el tiempo que tarda en cargarse un condensador C a corriente constante. I integrador, CP comparador, P puerta para el conteo de pulsos, S interruptor de inicio de conversión.

El problema de precisar muchos elementos de precisión para realizar un conversor analógico digital ha llevado a desarrollar otra familia de conversores que sólo requieren una referencia de tensión estable: son los conversores de *rampa* o de *integración* basados en cargar un condensador mediante una corriente proporcional a la tensión de entrada. Estos conversores, por las condiciones de diseño, presentan una excelente linealidad y elevada precisión, pudiéndose alcanzar fácilmente 16 bits a bajo costo. Sin

embargo, difícilmente pueden hacer más de unas pocas muestras por segundo (modelos de 12 bits y superiores). Una cualidad intrínseca del diseño de estos convertidores es su gran capacidad de rechazo del ruido, especialmente el inducido por la red de suministro eléctrico (50Hz o 60Hz). Para ello hay que diseñar el sistema para que el tiempo de integración sea múltiplo del periodo de la red.

La conversión se realiza midiendo el tiempo transcurrido ( $T$ ) entre el momento en el que se abre el interruptor  $S$  y el momento en el que la carga del condensador de integración  $C$  hace conmutar al comparador  $COMP$ . La medida del tiempo se realiza contando pulsos de reloj ( $CK$ ). La dificultad de este tipo de convertidores radica en su calibración y en el error introducido por las derivas que pueda presentar el sistema de amplificador operacional (integrador) y el comparador. Una solución es utilizar un convertidor de doble rampa.



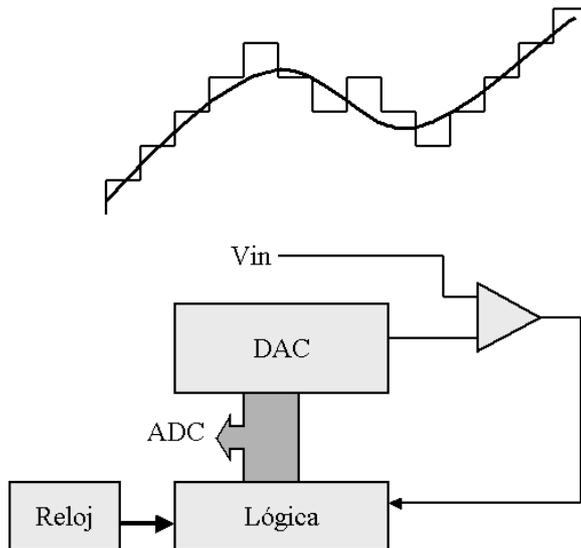
**Figura 4-12.** Convertidor analógico digital de doble rampa. Se carga el condensador  $C$  con una corriente de referencia durante un tiempo fijo  $TR$  y se mide el tiempo necesario para descargarlo con la corriente obtenida con la señal de entrada  $V_{in}$ .

Este tipo de convertidores comparan el tiempo necesario para cargar el condensador  $C$  mediante la corriente suministrada por la tensión a medir ( $V_{in}$ ) con el tiempo necesario para descargarlo hasta el nivel inicial (Ref.) mediante una corriente conocida generada por la fuente de referencia. La lógica de control conmuta la entrada del integrador entre la tensión a medir y la fuente de referencia. Inicialmente la entrada está conectada a potencial cero (masa).

En general todos los voltímetros digitales que se encuentran en el comercio operan bajo este principio, pues son dispositivos de una elevada precisión y estabilidad intrínseca y de muy bajo costo, pues no requieren ajustes críticos. Un convertidor analógico digital muy utilizado de doble rampa es ICL7109. Este circuito CMOS posee varias entradas de control que simplifican extraordinariamente su operación en múltiples configuraciones, tanto conectado directamente al bus del sistema de datos como su conexión directa a un dispositivo serie (UART) lo que le permite funcionar en modo remoto. De este convertidor existen versiones preparadas para activar directamente un visualizador de cristal líquido (LCD) como el 7106 o de diodos LED.

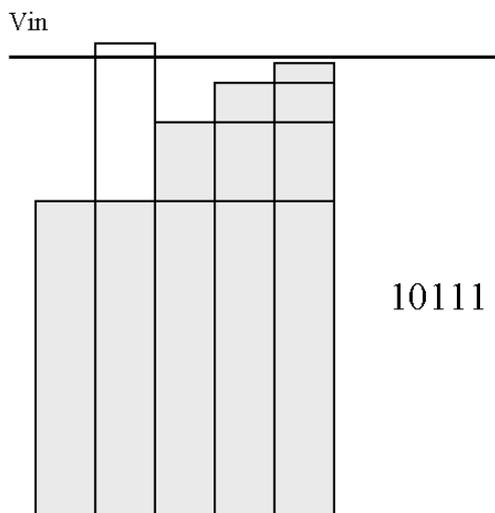
Otra familia de convertidores analógico digital se diseñan a partir de un convertidor digital analógico del tipo R-2R, cuya salida se compara con la tensión a medir mediante un circuito comparador. Una pequeña lógica de control varía la señal digital presente en la entrada hasta que la salida del convertidor iguala a la tensión a medir. La realización más

sencilla es utilizar un contador bidireccional conectado a la entrada del conversor digital analógico.



**Figura 4-13.** Convertor analógico digital de seguimiento. La salida de un conversor digital analógico se compara con la señal de entrada, según sea mayor o menor se incrementa o decrementa un contador asociado al conversor digital analógico.

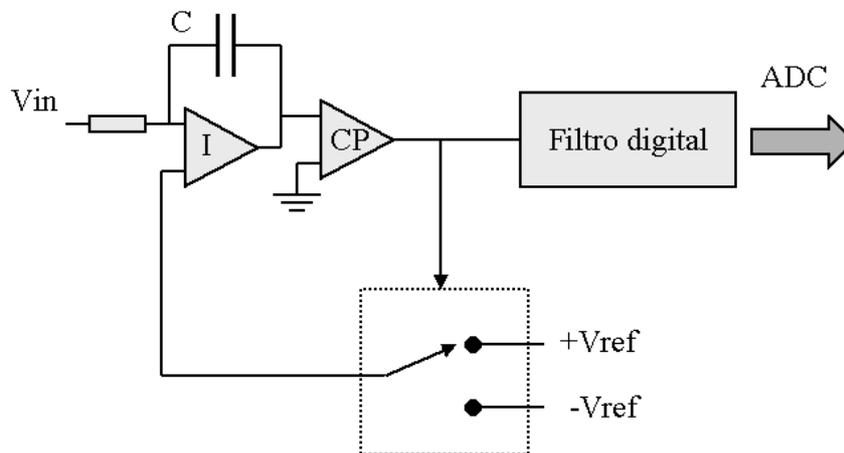
Según el comparador indique un valor superior o inferior, se incrementa o decrementa el valor del contador (*convertor de seguimiento*). Cuando la señal varía más rápidamente que la velocidad del conversor, los datos leídos quedan sistemáticamente por debajo o por arriba del valor correcto. Además, este tipo de conversor tiene que invertir un tiempo considerable hasta que el contador alcanza el valor correcto.



**Figura 4-14.** Conversión analógico digital por aproximación sucesiva. Un circuito similar al utilizado en los convertidores de seguimiento, pero ahora, cada vez que se realiza una conversión se ensayan los sucesivos bits empezando por el más significativo. Según se obtenga un valor menor o mayor se añade o no el bit al control del conversor digital analógico. El tiempo necesario (número de pulsos de reloj) es siempre igual al número de bits más uno.

Una solución a este problema es utilizar un algoritmo de aproximación sucesiva: se ensaya inicialmente con el bit más significativo, si es mayor este bit permanece a 0 durante todo el proceso y si es menor a 1. Seguidamente se ensaya con el segundo bit más significativo y se va repitiendo el proceso. El número de ensayos a realizar es igual al número de bits a convertir más uno, mientras que en un convertor de contador puede llegar a ser de  $2^n$  ensayos. Es muy importante que la señal de entrada no varíe durante todo el tiempo que dura la conversión, ya que un error en una sola de las comparaciones provoca que todo el código de salida sea erróneo. Para evitar que la señal de entrada varíe durante la conversión (unos pocos microsegundos) se utilizan circuitos de

muestreo y retención o cuando el espectro de la señal de entrada lo permite un simple filtro pasa bajos que limite la velocidad de variación de la señal por debajo de 1 bit menos significativo en el tiempo que dura una conversión. Los conversores analógico digitales disponibles en forma de circuitos integrados, como ADC0801 requieren muy pocos componentes externos: como son la referencia de tensión, los condensadores de desacoplo y el sistema de reloj (un cristal de cuarzo, una red RC o en generador externo). Las señales de control permiten seleccionar el circuito (CS), iniciar una conversión (WR), o leer los datos (RD). El estado del conversor (en reposo o realizando un conversión) se conoce mediante una señal fin de conversión (EOC o INTR). Muchos conversores R-2R son unipolares, para su utilización en modo bipolar se desplaza el cero a la mitad de la tensión de referencia, para ello basta con disponer de un divisor resistivo conectado a la entrada de conversor, entre la tensión de referencia y la entrada de señal (salida del amplificador de entrada). La rapidez, precisión y estabilidad de los conversores de aproximación sucesiva hace que estos sean los más utilizados en la gama de 8 a 16 bits y velocidades entre 10Hz y 1MHz. A velocidades menores se utilizan conversores de *doble rampa* y a mayores, conversores de tipo *flash*.



**Figura 4-15.** Conversor analógico digital *delta-sigma* se trata de un conversor con un integrador en el que a la señal de entrada se suma o resta una tensión de referencia. Este proceso se hace muy rápidamente, de forma que se obtienen una secuencia de 1 y 0 según el número de transiciones hayan sido necesarias para igualar a la tensión de entrada. Un filtro digital reduce la velocidad de muestreo al valor deseado, aumentando paralelamente la resolución.

Es importante proteger mediante diodos la entrada del conversor frente a tensiones que superen la alimentación o de polaridades inversas. Un amplificador operacional dispuesto a la entrada del conversor permite trabajar con una elevada impedancia de entrada, amplificar la señal de entrada o disponer de un filtro pasa bajos o pasa altos.

### Conversores de alta resolución

La resolución de los conversores analógico digitales está limitada a 16 bits, ya que la tecnología actual no permite ajustar y mantener los distintos componentes del conversor con precisiones superiores a  $2^{-16}$ . Además, el propio ruido térmico originado en los componentes, contactos y conductores es también mayor a  $2^{-16}$ . Estas resoluciones resultan insuficientes en algunos casos, como es la sismología, en la que el margen de variación de la señal puede superar ampliamente el  $2^{16}$ , sin embargo la señal a procesar presenta un espectro limitado y bastante bien definido que permite obtener una

resolución mayor utilizando un método de sobre-muestreo y un procesado digital posterior de los datos. Este tipo de conversores, que en banda limitada pueden alcanzar 24 bits de margen dinámico, se basan todos ellos en un conversor de un sólo bit operando a alta velocidad en seguimiento continuo de la señal.

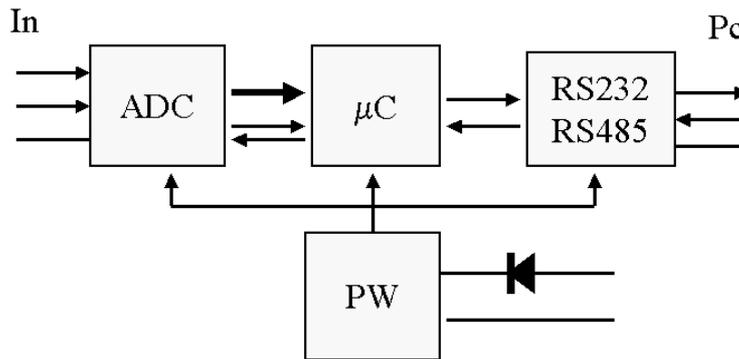
El circuito básico consta de un amplificador diferencial, seguido de un integrador y un comparador, Según la salida del comparador indique mayor o menor se inyecta una carga  $dQ$  o  $-dQ$  obtenida a partir de la misma referencia de tensión. De este modo a la salida del comparador se obtiene una secuencia de 1 y 0 que corresponde a las variaciones de la señal de entrada. Esta secuencia digital se procesa en tiempo real mediante un filtro digital. Este proceso de señales permite reducir el ruido del sistema y obtener información válida correspondiente a variaciones de señal inferiores al salto de 1 bit en el conversor. La eficacia de este tipo de conversores radica en el elevado número de conversiones que realizan por segundo (200KHz ) que el proceso digital reduce a menos de 200Hz. El proceso de filtrado se realiza en dos pasos: en el primero se promedia la señal y se reduce en un factor 100 o superior (diezmado). Este filtro digital presenta una respuesta del tipo  $\text{sen}(x)/x$  (figura). El segundo filtro es un filtro pasa bajos de corte muy abrupto. Este tipo de conversores siempre proporcionan el código de salida en serie, con el reloj ligado a la frecuencia aparente de muestreo, aunque es posible con ciertas limitaciones operar con reloj externo. En caso de que se desee un código paralelo basta con disponer de dos/tres registros de desplazamiento de 8 bits.

Por su propia estructura estos conversores no permiten multiplexar la señal de entrada, funcionando siempre como conversores de seguimiento continuo de la señal de entrada. Un cambio brusco en la entrada requiere varios ciclos de medida. Además, cada vez que se aplica la tensión de alimentación entran en un ciclo de auto-calibrado, que también es accesible externamente. Un ciclo de lectura especial permite conocer los coeficientes del filtro y las constantes de calibración. Todos estos conversores poseen diversas ganancias, aunque no son compatibles todas ellas con los modos de operación en alta resolución. El costo de este tipo de conversores es relativamente bajo, ya que se utilizan masivamente en los equipos de sonido digital. Las características de estos conversores dependen fuertemente de la velocidad de muestreo elegida y de la amplificación elegida.

### **Conversores analógico digital de aplicación general**

Actualmente hay multitud de conversores analógico digitales, resultando en ocasiones difícil decidirse por un modelo concreto. Los criterios de selección pueden ser:

- Facilidad y seguridad de suministro
- Condiciones de operación
- Velocidad de muestreo
- Resolución
- Salida de datos serie o paralelo
- Señales necesarias para su operación
- Consumo
- Precio



**Figura 4-16.** La utilización de un convertor analógico digital requiere un mínimo de componentes auxiliares para que pueda funcionar de forma sencilla. Se parte de un convertor analógico digital (ADC), operado por un microcontrolador ( $\mu\text{C}$ ) que proporciona los datos del convertor en un formato estándar aceptado por los computadores. En muchos casos se requiere un adaptador de nivel (RS232/RS485) para acoplar el dispositivo a la línea de transmisión y a la entrada del computador. Una fuente de alimentación protegida contra cortocircuitos e inversiones de polaridad completará el circuito.

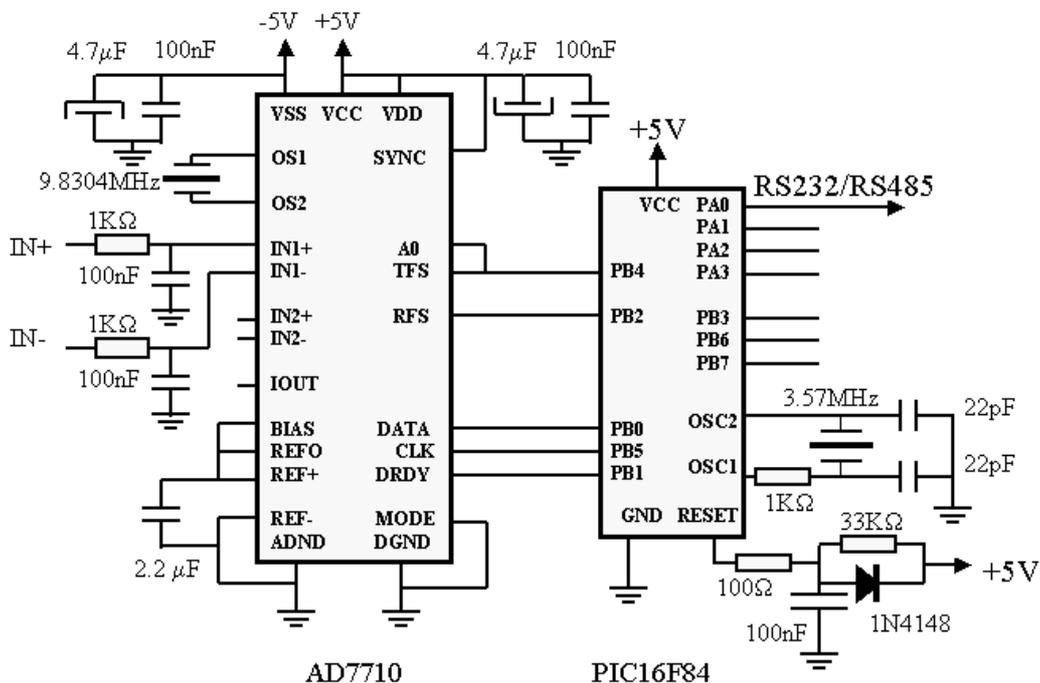
Es muy importante analizar la facilidad y seguridad de suministro, pues la implementación de un convertor analógico digital supone un considerable esfuerzo en realización de placas de circuito impreso y en desarrollo del software para su operación y no podemos estar sujetos a que en pocos meses sea descatalogado. Se debe tener presente que en el entorno de los volcanes activos las condiciones de operación son muy extremas, por consiguiente deberemos elegir circuitos que presenten buena estabilidad térmica y soporten temperaturas extremas. La velocidad de muestreo y la resolución son dos parámetros fáciles de elegir, pues los fabricantes ofrecen sus productos bajo estos dos parámetros. La salida serie o paralelo depende del tipo de interfase que se disponga, en general vamos a trabajar con interfases serie que permiten una fácil conexión a un microcontrolador mínimo. El número de señales necesarias para su operación condiciona el número de líneas de entrada salida que el microcontrolador deberá disponer para manejar el convertor. El consumo es importante en equipos que deban operar aislados, aunque la mayor contribución en ese campo es el sistema de telemetría o de almacenamiento de datos. En general no hay grandes diferencia de precio entre los convertidores de características similares.

En general precisaremos convertidores lentos y de alta resolución como son los convertidores de tecnología *delta-sigma*. Solo en aplicaciones muy especiales utilizaremos convertidores de menor resolución (12 bits) como puede ser en el caso de que el consumo sea una condición primordial o que las características de las señales no justifiquen el empleo de un convertor de alta resolución. Aunque, dada la poca diferencia de precio, es preferible decidirse por un convertor de alta resolución y utilizarlo en todas las aplicaciones, con ello se simplifica el mantenimiento y el tiempo invertido en desarrollos.

En muchos casos es posible utilizar módulos comerciales para realizar la adquisición de datos, pero en general no han sido concebidos para trabajar en el campo, requiriendo una potencia excesiva y no siempre adaptados a condiciones extremas. En general, estos módulos están diseñados para operar con computadores de sobremesa o portátiles de elevadas prestaciones por lo que su operatividad sobre el volcán es reducida.

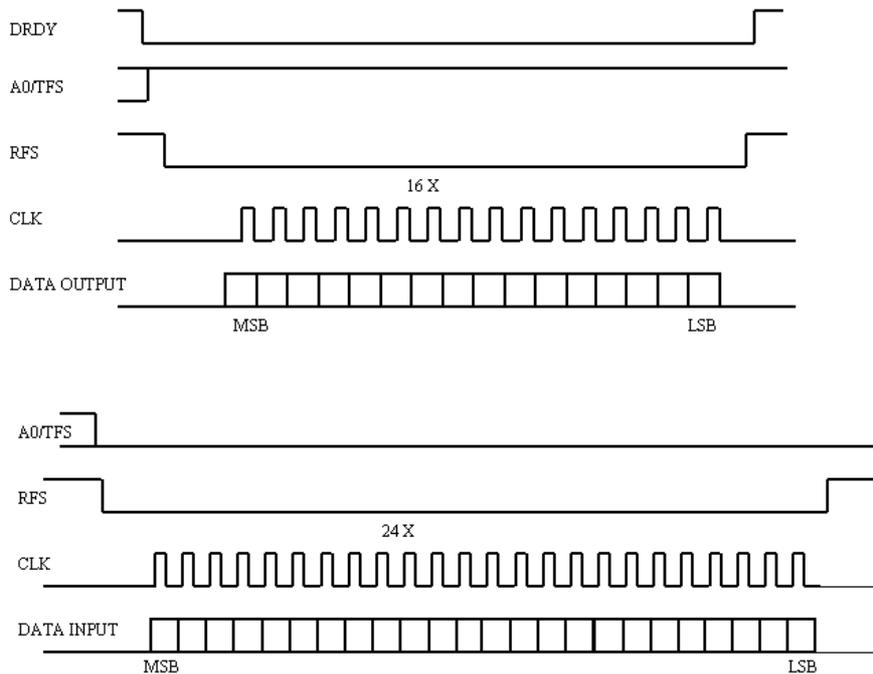
## AD7710

Se trata de un convertor delta-sigma de 24 bits de resolución nominal, pues esta tecnología, relativamente reciente, copa todos los convertidores de alta resolución disponibles en el mercado. El convertidor AD7710, de *Analog Devices*, opera con alimentación simétrica de +5V y -5V. Y posee un amplificador incorporado con ganancia ajustable entre 1 y 128, lo que permite prescindir del preamplificador para conectarlo a un geófono convencional. Este convertidor acepta entradas bipolares con respecto a masa, que simplifica mucho la operación con la mayor parte de los sensores. Tiene el inconveniente de requerir muchas líneas para su operación que complica la realización de la interfase con el microcontrolador. La posibilidad de variar la amplificación por software y que acepte entrada bipolar hace que este convertidor sea una de las mejores opciones para desarrollar sistemas de registro sísmico.

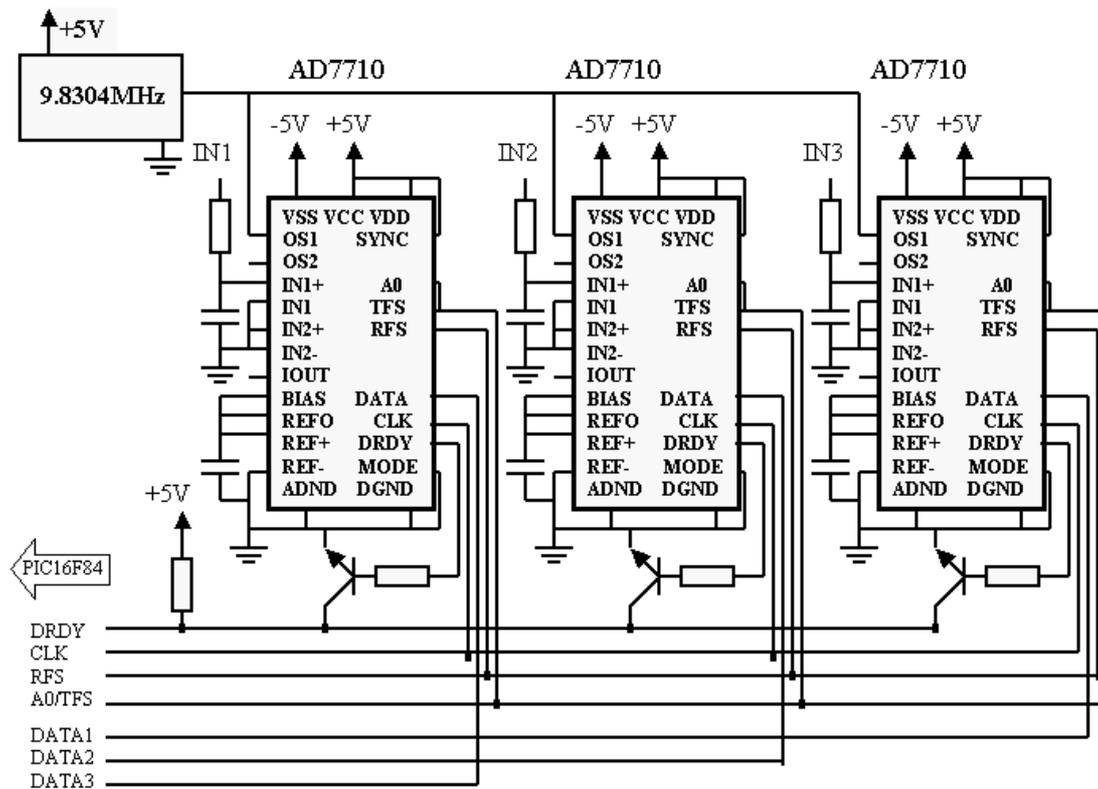


**Figura 4-17.** Circuito práctico para utilizar un convertor AD7710. Como microcontrolador se ha elegido un PIC16F84. La salida del microcontrolador es directamente compatible con la entrada RS232 del computador. En caso de que se desee una interfase bidireccional o utilizar cables largos deberá incluirse un adaptador de nivel como el MAX232 (MAX220) para RS232 o MAX485 para RS485.

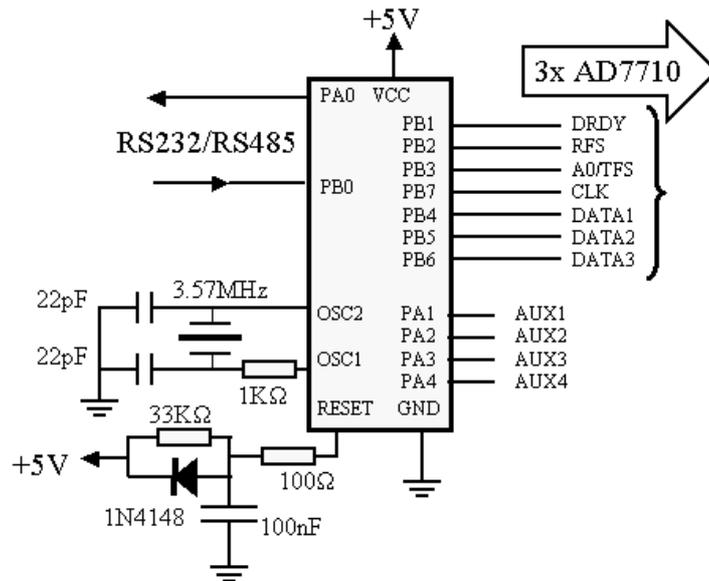
La operación del convertidor se controla escribiendo en un registro de control la frecuencia de muestreo, el formato de los datos y la ganancia. Además, posee la posibilidad de realizar calibraciones sin interrumpir el proceso de medida. Se utiliza un cristal de 9.8304 MHz. Para poder obtener frecuencias de muestreo exactas de 200 Hz., 100 Hz., 50 Hz. El microcontrolador utiliza un cuarzo de 357 MHz. Que permite generar fácilmente las frecuencias estándar de comunicaciones serie (9600 baudios). Es necesario desacoplar adecuadamente todas las líneas de alimentación con condensadores electrolíticos en paralelo con un condensador de calidad (multicapa, etc.). Las líneas de entrada-salida del microcontrolador que no se utilizan se pueden ocupar con un grupo de micro-interruptores que permiten seleccionar distintas opciones del software de control, como la frecuencia de muestreo o la ganancia del convertidor



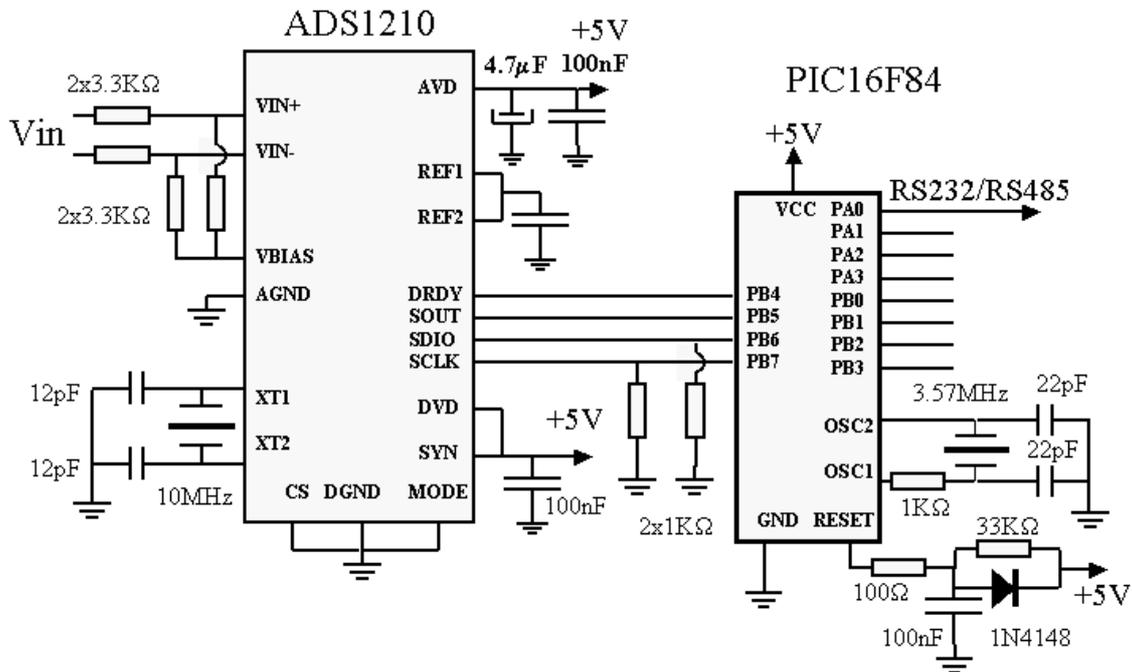
**Figura 4-18.** Señales necesarias para controlar el AD7710. Posee una interfase serie debiéndose primero enviar un mensaje de configuración y después leer los datos al finalizar cada medida.



**Figura 4-19.** También es sencillo construir un módulo para tres canales. Como los convertidores delta-sigma no permiten multiplexar rápidamente las señales de entradas se necesita un convertidor para cada canal que comparten las líneas de control. Se utiliza un transistor (BC107) para mezclar las tres señales de fin de muestra.



**Figura 4-5.** Se utiliza un sólo microcontrolador PIC16F84 para manejar los tres convertores AD7710.



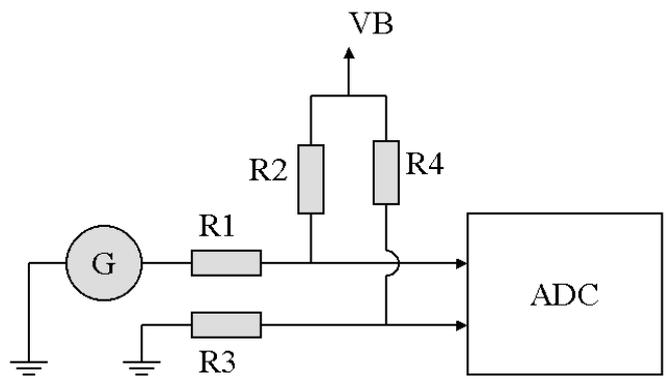
**Figura 4-20.** Módulo de adquisición de datos realizado con un convertor analógico digital ADS1210 y un microcontrolador PIC16F84. Obsérvense las dos resistencias de 10 KΩ a masa en las líneas de reloj SCLK y datos SDIO. Estas resistencias evitan que durante el arranque el convertor interprete la inicialización de las entradas y salidas del microcontrolador como comandos.

## ADS1210

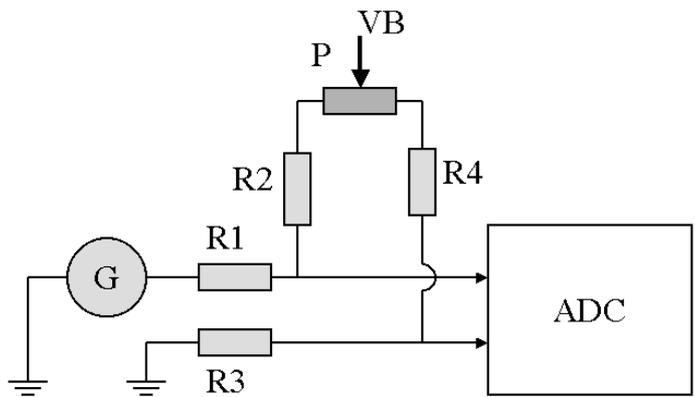
Se trata de otro convertor de tecnología delta-sigma de 24 bits de resolución producido por Burr-Brown. Precisa menos líneas de control, de hecho puede operar con sólo dos líneas, pero el software es más sencillo con cuatro líneas. Este convertor sólo acepta señales positivas, lo que obliga a disponer de un circuito de entrada para cambiar el nivel. En muchos casos puede ser suficiente emplear un doble divisor resistivo como se

muestra en el esquema. En otros deberemos incluir un amplificador operacional, que habrá que seleccionar con mucho cuidado para mantener la tasa de ruido dentro de límites aceptables. También dispone de un preamplificador de ganancia variable (1 a 16) y diversos modos de operación que permiten buscar un compromiso entre consumo, precisión y frecuencia de muestreo. Sin embargo no es posible cubrir todo el rango de 24 bits en todas las escalas ni modos de operación. Por consiguiente debe estudiarse detalladamente cual es el punto de operación deseado, en este sentido es preferible utilizar el AD7710.

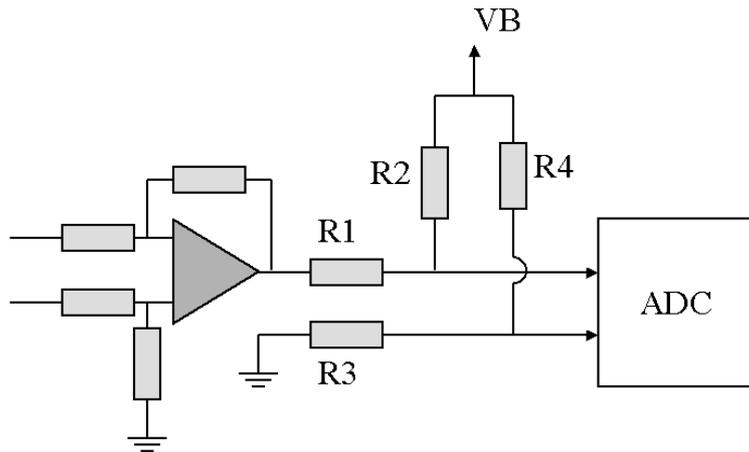
La operación es similar al AD7710, se debe enviar primero un comando, especificando la frecuencia de muestreo y la ganancia, y después leer los tres Bytes de datos. Es importante prestar atención al hecho que los comandos deben enviarse sólo cuando lo autoriza el convertor (DRDY bajo), en caso contrario puede producirse un comportamiento errático del convertor. La necesidad de utilizar un puente resistivo a la entrada para poder manejar señales negativas obliga a operar siempre con elevadas ganancias en el convertor, pues en caso contrario es imposible aprovechar todo el margen dinámico. También debe cuidarse la secuencia de arranque, polarizando a masa las líneas de entrada al convertor para evitar que se confunda la programación de estas líneas, por parte del microcontrolador, como comandos



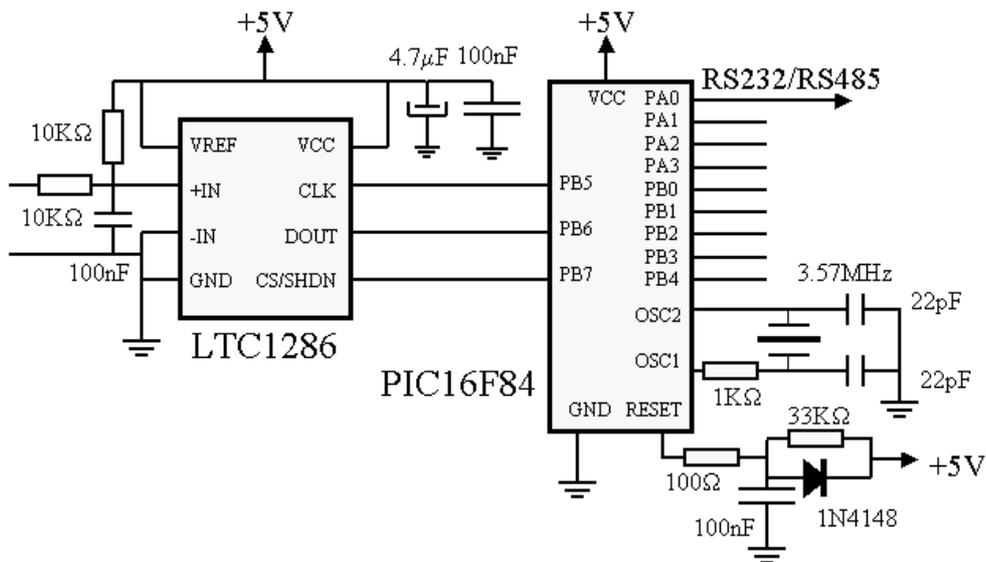
**Figura 4-21.** La utilización de un puente resistivo para polarizar adecuadamente la entrada diferencial de forma que pueda aceptar señales negativas debe hacerse teniendo en cuenta la resistencia interna del generador de señal G. La resistencia R3 debe ser igual a  $R1 + G$  y  $R2 = R4$ .



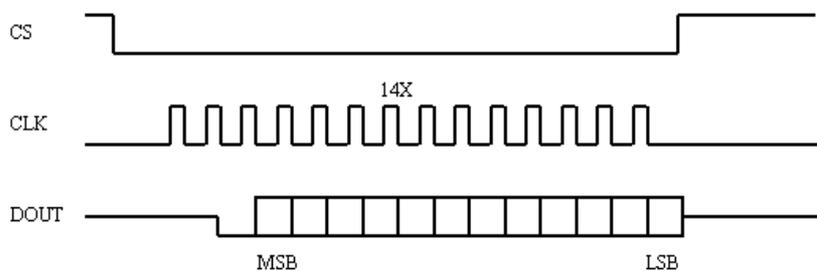
**Figura 4-22.** La impedancia de salida de la funete se puede compensar fácilmente con un potenciómetro P.



**Figura 4-23.** En muchos casos es necesario utilizar un amplificador diferencial alimentado simetricamente (+5V, -rV) que proporciona una muy baja impedancia de salida y de esta forma el sistema es independiente de la impedancia de la fuente.



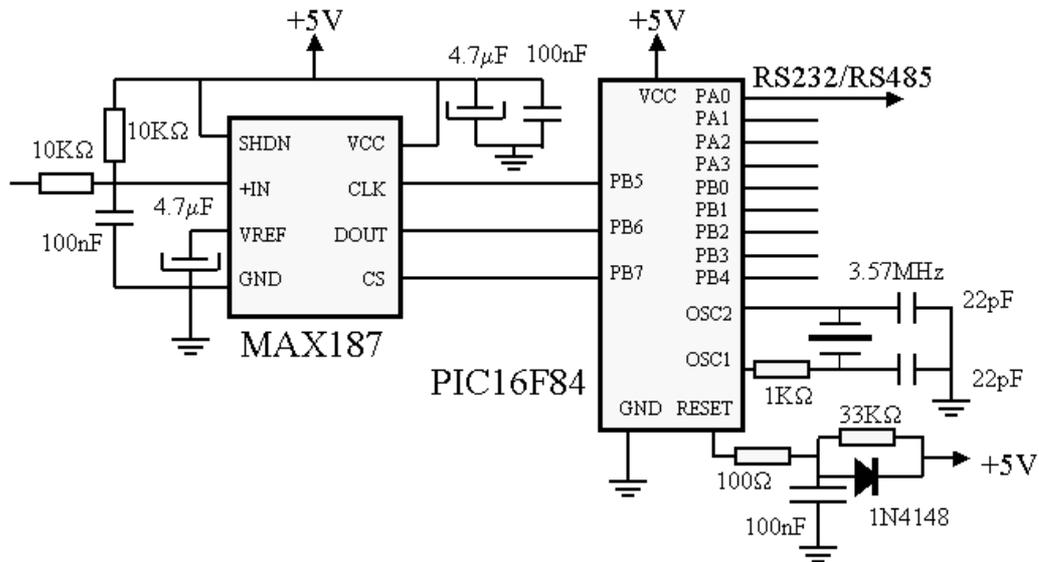
**Figura 4-24.** Conversor de 12 bits de aproximación sucesiva, interfase serie y bajo consumo. Se utiliza la misma fuente de alimentación como tensión de referencia. El microcontrolador debe ser también de bajo consumo (PIC16FL84).



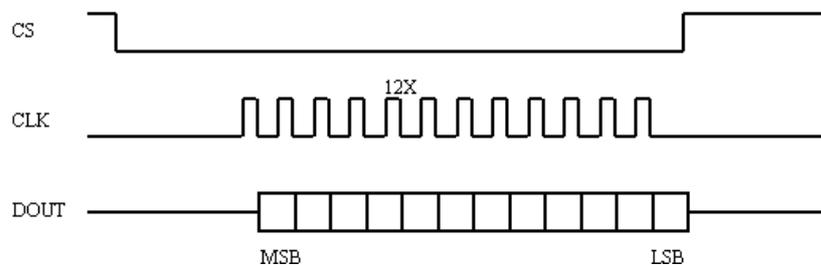
**Figura 4-25.** La interfase serie es muy sencilla, basta con seleccionar el conversor (CS) y enviar doce pulsos de reloj.

## Conversores de 12 bits.

La diferencia de precio ya no justifica utilizar en aplicaciones de baja frecuencia conversores de baja resolución, salvo en casos en que el consumo sea primordial. En general 12 bits es una resolución insuficiente en sismología, incluso operando con sensores de baja calidad. Igualmente en los inclinómetros es poca sensibilidad salvo que se disponga de un complejo mecanismo de ajuste de cero. Los conversores de aproximación sucesiva de 12 bits son componentes muy sencillos de operar, con una interfase serie de dos o tres hilos, por la que envían ráfagas con los doce bits en serie. El consumo es muy reducido, pero cuando se requiere una referencia de tensión de precisión o un preamplificador esta ventaja puede quedar muy reducida. Estos conversores se utilizan mucho en equipos autónomos de adquisición de datos a muy baja velocidad, por ejemplo un dato a la hora y en los que no se requiere mucha precisión. Este tipo de instrumento puede permanecer mucho tiempo en situación de espera con consumo muy reducido, se conecta toma el dato y vuelve a reposo. En estos casos este tipo de conversor es el ideal pues sólo consume en el momento en que está realizando la medida, volviendo automáticamente al estado de bajo consumo.



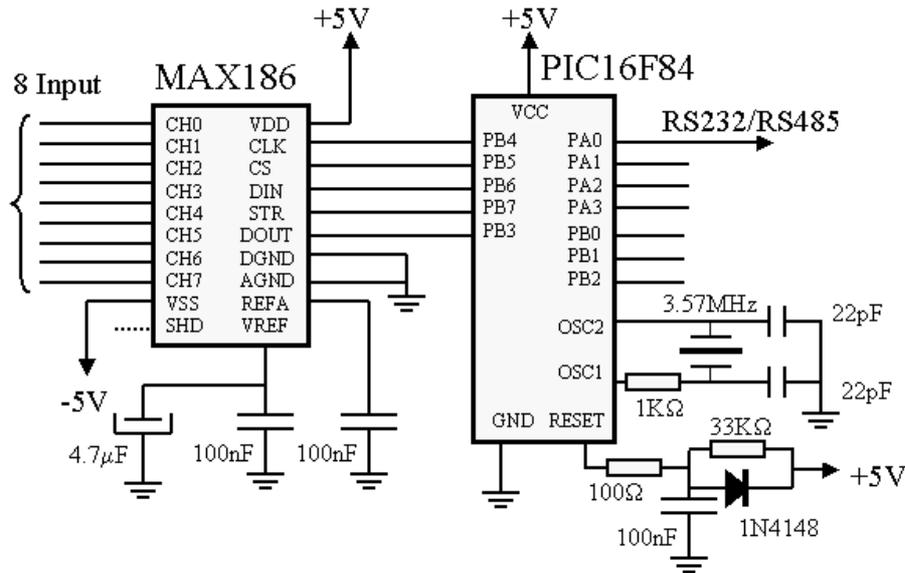
**Figura 4-26.** Otro conversor de 12 bits de aproximación sucesiva, con interfase serie y bajo consumo. También utiliza la misma fuente de alimentación como tensión de referencia. El microcontrolador debe ser también de bajo consumo (PIC16FL84).



**Figura 4-27.** La interfase serie es semejante a la utilizada por el MAX187, basta con seleccionar el conversor (CS) y enviar catorce pulsos de reloj.

## Convertor de 8 canales y 12 bits.

En muchos casos se precisa medir varias señales sin requerir una precisión excesiva, bien porque se trate de señales con mala relación señal ruido o por la propia naturaleza de las señales como es el caso de una estación meteorológica. En estas circunstancias resulta conveniente utilizar un convertor analógico digital con varias entradas. Comercialmente se encuentran muchos convertores de este tipo, siendo generalmente de 8 canales de entrada como es el MAX186 que tiene una resolución de 12 bits. Este convertor es de muy sencilla operación y permite solucionar fácilmente las situaciones donde se requiere medir muchas señales.

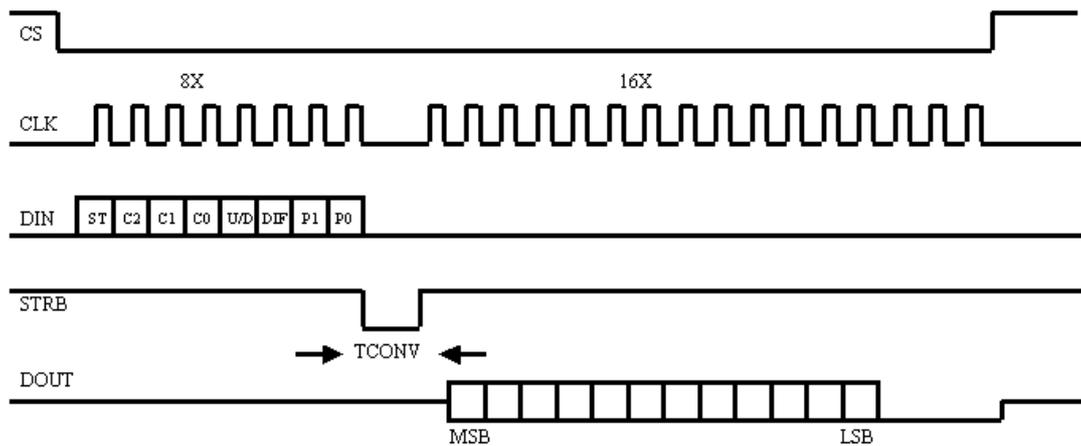


**Figura 4-28.** Se utiliza un convertor de aproximación sucesiva, de 12 bits y 8 canales de entrada (MAX186) controlado por un microcontrolador PIC16F84. De esta forma se obtiene una salida serie estándar que podemos conectar directamente al puerto RS232 del computador.

La configuración propuesta se basa en la utilización de un convertor analógico digital de 12 bits y 8 canales de entrada (MAX186), capaz de operar a 100KHz de frecuencia de muestreo y referencia de tensión incorporada internamente. Es necesario disponer un sistema de filtros *antia-aliasing* en cada una de las entradas para limitar la señal por debajo de la mitad de la frecuencia de muestreo. Se utiliza un microcontrolador PIC16F84 para proporcionar todas las señales de control y obtener una salida directamente compatible con el computador.

Como en todos los convertores de alta resolución es necesario que la masa analógica y la masa digital tengan sólo un punto en común y que este sea precisamente el pin correspondiente a la masa analógica del convertor. Igualmente es importante incluir condensadores de desacoplo en las alimentaciones de todos los chips. Esto es especialmente importante en las alimentaciones del convertor. Estos condensadores deben disponerse lo más próximos posible al correspondiente pin. También debe desacoplarse la tensión de referencia. Finalmente, los conductores correspondientes a la señal de entrada no deben circular cerca de señales digitales. Una fuente de ruido importante es la generada en los propios circuitos integrados del filtro antialiasing debido a que el ruido aumenta considerablemente con la frecuencia y el convertor utiliza un tiempo muy corto para adquirir el dato, por lo que no tiene tiempo de cancelar el ruido al promediar la señal. Para corregir este efecto debe utilizarse un pequeño filtro

RC dispuesto lo más cerca posible del correspondiente pin de entrada. Los valores recomendados para operar con frecuencias de reloj del orden de 1MHz son 220Ω y 10nF. El filtro antialiasing deberá diseñarse para una frecuencia de corte del orden de un tercio o un cuarto de la frecuencia de muestreo. En general, cuando se trata de adaptar una red analógica ya existente al registro digital, suelen servir el mismo sistema de filtros, debiendo sólo incluir un pequeño atenuador o amplificador para adaptar el nivel de señal al requerido por el conversor, tratando de optimizar la relación señal ruido. Es importante cuidar en sistemas FM que la subportadora de audio quede suficientemente atenuada por el filtro, ya que al tener mucha mayor sensibilidad el sistema digital, estas señales parásitas pueden llevar a inhibir la correcta operación del algoritmo de detección.



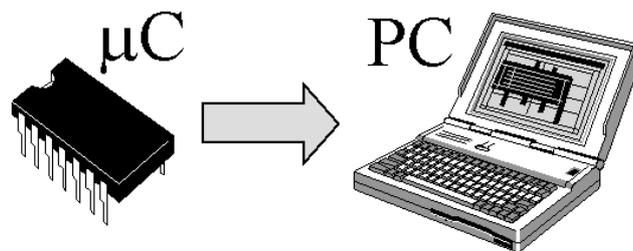
**Figura 4-29.** El MAX186 posee una línea serie de entrada de comandos y otra de salida de datos, funcionando ambas bajo el mismo reloj. Primero el microcontrolador envía una ráfaga de 8 bits con un bit de sincronismo, el número del canal que se desea medir, la polaridad de la señal (unipolar o bipolar) y si se desea una configuración de entradas diferencia o referida a masa. Seguidamente el conversor realiza la medida (STRB a nivel bajo) y al finalizar (STRB sube a nivel alto) se pueden leer el dato en una ráfaga de 16 bits. Al finalizar la medida de todos los canales, el microcontrolador ordena los datos de acuerdo al formato deseado (binario, ASCII) incorporándole la cabecera necesaria para su identificación y los transmite al computador en serie a 9600 baudios.

## Fuentes de alimentación

Los conversores analógico digitales y sus elementos de control requieren 5V (3 V en las realizaciones de muy bajo consumo) para la alimentación digital y en muchos casos una tensión negativa -5V. Dado que los límites de la señal de entrada al conversor son +5V, es recomendable alimentar toda la sección analógica con +8V y -8V para evitar que los operacionales corten las excursiones de la señal en las proximidades de 5V. Unos simples diodos protegen las entradas del conversor en caso de excursiones excesivas. El bajo consumo permite utilizar una pequeña fuente conmutada doble para obtener todas las tensiones necesarias a partir de la propia alimentación del sistema de Pc. También pueden utilizarse fuentes conmutadas integradas del tipo MAX638 para la rama positiva y un ICL7660 (o un MAX660) para la rama negativa del conversor. Además deberemos disponer de las tensiones de alimentación para el sistema de filtros, que pueden obtenerse también mediante fuentes conmutadas o reguladores serie convencionales, en función de lo crítico que sea disminuir el requerimiento energético. En aquellos casos donde ya existe una alimentación simétrica a 12V o 15V puede utilizarse directamente

con sólo incluir un reguladores serie positivo (LM7805) y negativo (LM7905) para el conversor, y adoptar las precauciones elementales de desacoplar cuidadosamente mediante condensadores las líneas de alimentación en su entrada a la unidad de adquisición.

La fuentes de alimentación se deben diseñar de forma que todo el equipo funcione con una alimentación única de 12V. Es importante que acepte un amplio margen de funcionamiento, pues cuando se utilizan baterías con generadores eólicos o paneles solares las tensiones pueden variar entre 9V y 17 V. El consumo de todo el sistema suele ser inferior a 20mA, mucho menor que el requerido por el Pc. Hay que cuidar especialmente las conexiones al sistema central de alimentación, ya que no es raro que las diferentes fuentes conmutadas generen un ruido excesivo para la resolución del conversor: la solución radical es utilizar fuentes independientes, si ello no es posible deben utilizarse cables gruesos e independientes, especialmente para la masa, para las distintas secciones (telemetría, registradores gráficos, filtros, conversor y ordenador. Cuidar también las conexiones a la batería y de esta al sistema de carga. En bastante frecuente que un equipo opere satisfactoriamente con baterías y plantee problemas al conectar el cargador. Controlar que el cargador sin batería no suministre una tensión superior a la máxima que puedan soportar los distintos circuitos. Una desconexión errónea de la batería, estando conectado el cargador, puede destruir todo el equipo. Es conveniente disponer a la entrada de un diodo serie que permita el paso de varios amperios y que sirva de protección ante la conexión invertida de la batería. Esta es la causa principal de la destrucción de los instrumentos utilizados en geofísica. En casos de que se desee trabajar con niveles muy bajos de tensión de la batería (menos de 10V) se puede disponer de una protección alternativa en base a un fusible y un diodo en paralelo. Este diodo debe disponerse en la rama positiva, ya que en caso contrario tendríamos una caída de potencial del orden de 0.7V con respecto a masa.

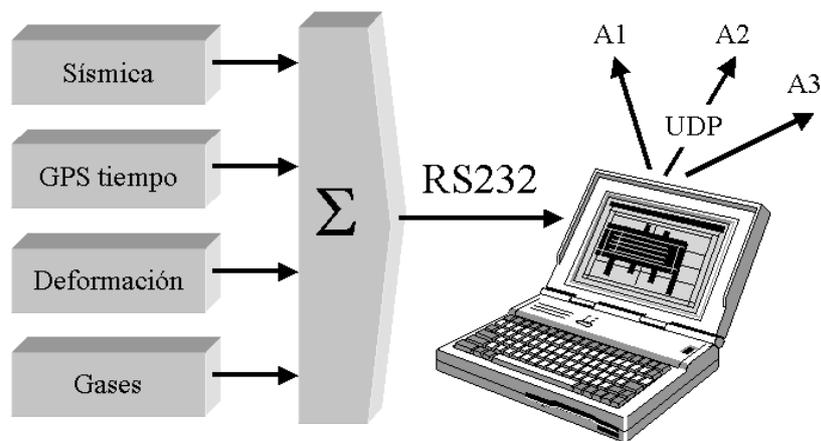


**Figura 4-30.** En un sistema de adquisición de datos, el conversor analógico digital estará controlado por un microcontrolador ( $\mu\text{C}$ ) que transmitirá la información a un computador (PC). Habrá que desarrollar el software para ambos sistemas. Los programas para el sistema de microcontroladores se construyen en ensamblador utilizando las herramientas propias de cada dispositivo. Por el contrario, los programas para los computadores se escriben utilizando lenguajes de alto nivel (C, BASIC, JAVA, etc.) compilándolos para el correspondiente sistema operativo.

### Software para el control de conversores analógico digital

La realización de un conjunto instrumental para el seguimiento de la actividad volcánica implica conjugar múltiples elementos, tales como sensores, condicionadores de señal, conversores analógico digitales, enlaces telemétricos, computadores para adquisición de datos y para su análisis. Este sistema estará soportado por un conjunto de elementos físicos (hardware) y una serie de aplicaciones informáticas (software) que deberán

operar conjuntamente. En general, estas aplicaciones deberemos desarrollarlas, pues difícilmente se van a poder encontrar paquetes comerciales para el análisis de las señales propias de la vigilancia de volcanes. Otro aspecto importante es que habitualmente el sistema estará constituido por varias plataformas, desde módulos electrónicos con microcontroladores a redes formadas por computadores trabajando bajo distintos sistemas operativos. Esto implica que el software correspondiente a cada uno de estos elementos se deberá desarrollar utilizando distintos lenguajes y herramientas. Hay que tener presente al diseñar el software que en cualquier momento puede ser necesario modificarlo, integrando nuevos componentes o eliminando ciertas funciones. También deberá tenerse presente que el sistema pueda ser operado con personal sin especial formación, por ejemplo durante una crisis, por lo que las interfases de usuario deben ser fácilmente asimilables por el operador.

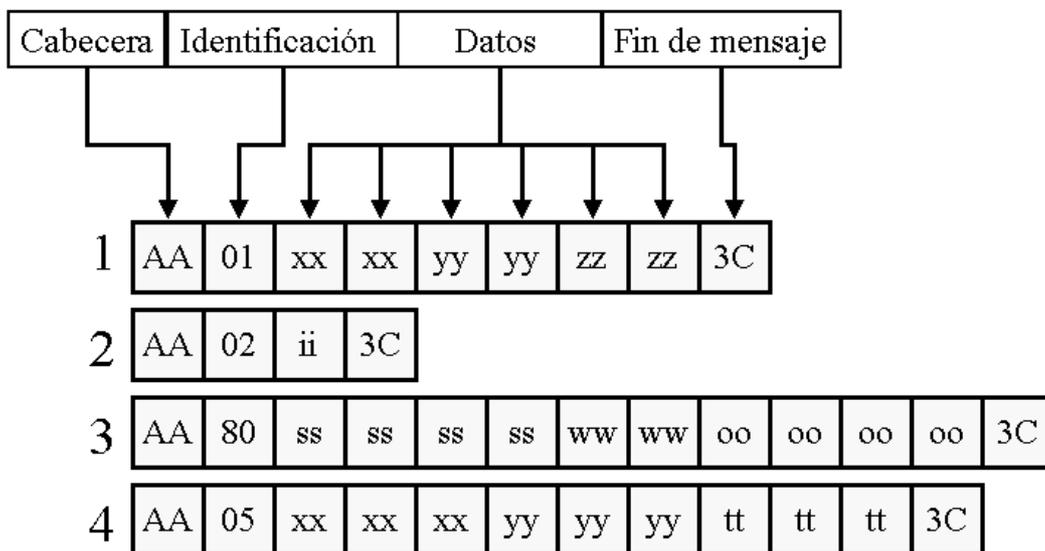


**Figura 4-31.** En un sistema de adquisición de datos llegan datos procedentes de varios sensores, con secuencias de medida distintas. La figura representa un sistema típico en seguimiento de la actividad volcánica, donde se registra la actividad sísmica, la deformación y la emisión de gases. Los datos llegan al computador por una única línea de telemetría, el procesador identifica cada ráfaga y la envía a la correspondiente aplicación (A1,A2,A3) mediante mensajes bajo protocolos UDP o TCP/IP.

### Sistemas multiparamétricos. Formato de los datos

En un sistema de seguimiento de la actividad volcánica se integran datos de muy distinta índole, como es sísmica, deformación, gases, temperaturas, campo magnético, etc. Por ello al sistema de adquisición le llegan datos de varios tipos, con secuencias distintas, utilizando puertos distintos o compartiendo el mismo puerto y enlace de telemetría. En estos casos es conveniente que cada dato sea independiente, pues de esta forma, el fallo de un sistema no supone ningún problema para el resto. Una solución es dotar a cada dato de una cabecera que permita su fácil identificación. Para facilitar la decodificación y evitar errores, se ha optado por una cabecera de dos bytes, el primero permite identificar el inicio de la secuencia, el segundo el tipo de dato. Todos los mensajes terminan con un byte de fin de secuencia. De esta forma se reducen las posibilidades de error sin sobrecargar el sistema y sin necesidad de utilizar enlaces bidireccionales. Para evitar las pérdidas de datos por interferencias, especialmente frecuentes en telemetría radio, se transmite cada dato independientemente, de esta forma en caso de interferencias sólo perdemos un dato y no un paquete. Si se utilizan enlaces

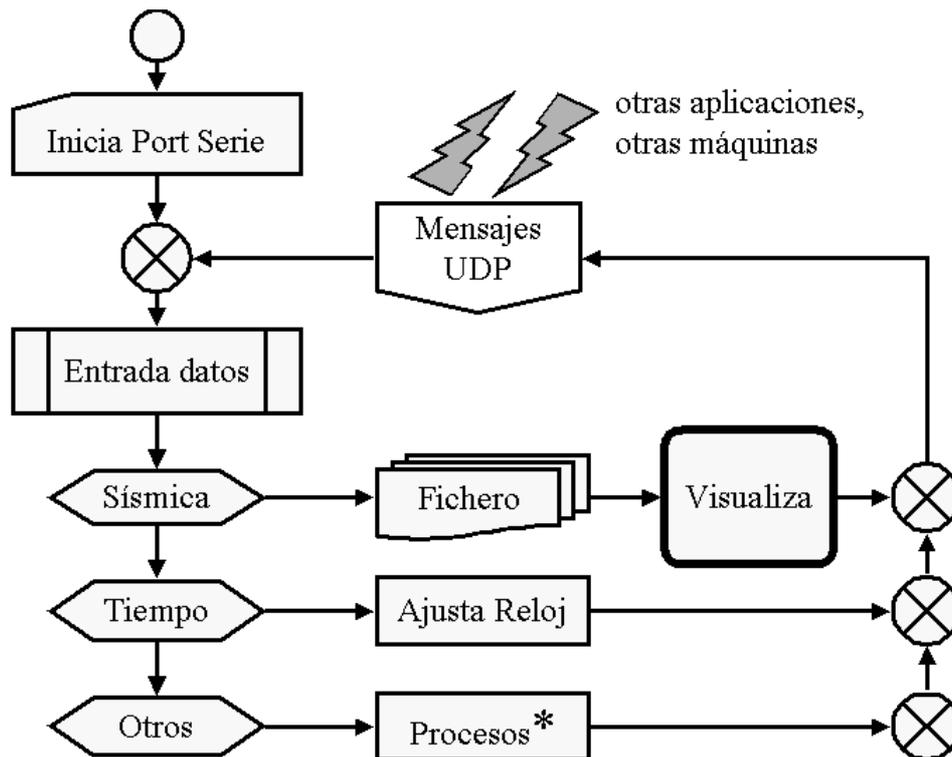
bidireccionales de alta velocidad puede ser conveniente cambiar este modelo y pasar a utilizar paquetes de datos con estructuras más complejas. Sin embargo, los enlaces situados sobre el volcán son en general muy sencillos y de carácter unidireccional. El formato para la transmisión de los datos se ha optimizado para que sea fácil su implementación en microcontroladores con muy poca memoria y que operan a frecuencias lo más bajas posibles para disminuir el consumo energético. Para la cabecera (hexadecimal AA) y el fin de mensaje (hexadecimal 3C) se han elegido caracteres cuya representación en binario sea fácilmente identificable por el microcontrolador mediante un análisis bit a bit de las secuencias de entrada. El carácter para la identificación del canal puede ser cualquiera, disponiéndose así de 256 posibilidades. En algunos casos es necesario mejorar la inmunidad frente a interferencias que pueden provocar el fallo de algún bit, por ejemplo cuando se utiliza una telemetría radio, para evitarlo es suficiente incluir uno o dos bytes para el control de la paridad, esta información se inserta antes del carácter de fin de secuencia.



**Figura 4-32.** Ejemplo de formato de datos en la que cada secuencia binaria posee la misma estructura: cabecera, identificación, datos y fin de mensaje. La figura muestra los formatos para sísmica de tres canales y 16 bits (1), para información sobre el instrumentos (2), para mensajes de tiempo GPS (3) y para deformación con dos componentes de inclinación y la temperatura en 24 bits (4). El código hexadecimal AA (10101010) corresponde a la cabecera, 3C (00111100) a fin de mensaje, 01, 02, 80, 05 son identificativos de dato.

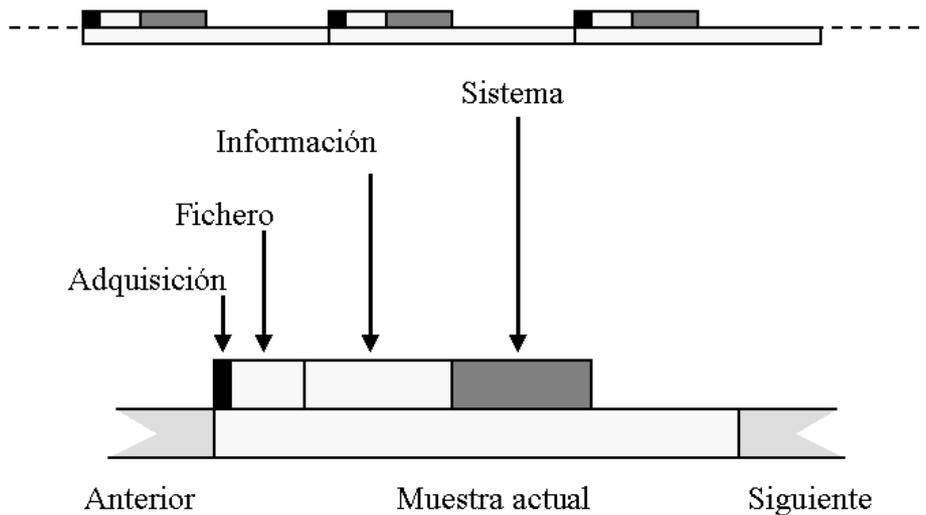
### Procesado de los datos

Una vez los datos llegan al computador se pueden estructurar en paquetes, que se envían a las distintas aplicaciones para su procesamiento y análisis. Estas aplicaciones pueden estar soportadas en el mismo computador, en computadores distintos enlazados por una red local o en sistemas remotos a los que se accede mediante Internet. En los dos primeros casos podemos utilizar protocolos sencillos como son los mensajes UDP, en caso de acceso a través de Internet se requiere un protocolo TCP/IP o derivados o utilizar mensajería tipo correo electrónico.



**Figura 4-33.** Diagrama bloque de un sistema de adquisición de datos multiparamétrico. La figura corresponde a un sistema de registro sísmico que comparte el enlace telemétrico con deformación, gases y un receptor GPS para sincronismo horario.

Es importante cuidar la respuesta del sistema frente a un error en el tráfico de mensajes. Debe evitarse que el fallo de un mensaje, por ejemplo la interrupción en la llegada de algún tipo de datos, provoque el colapso del sistema. Este tipo de errores es muy frecuente cuando se utilizan protocolos TCP/IP cuando una de las máquinas no está disponible. Además, deberemos contar con sistemas alternativos, por ejemplo los distintos computadores deben poseer capacidad de almacenaje suficiente para varios días, de forma que ante cualquier rotura del servicio de mensajería, los datos no se pierdan y puedan recuperarse por otros métodos. Es importante que la arquitectura del sistema se pueda modificar fácilmente, desde la estructura más sencilla y a la vez más cuidada, utilizada para la vigilancia en periodos de actividad estacionaria del volcán, a la necesaria para el seguimiento de una crisis volcánica donde la instrumentación varía en función de la actividad del volcán y de los medios disponibles en cada momento. Por ejemplo, en la atención de una crisis es frecuente que se vayan incorporando al sistema de vigilancia equipos procedentes de otros organismos e instituciones, nacionales o extranjeras, y cada uno de ellos con sus propias peculiaridades. Si el sistema se diseña teniendo esto presente, después es muy fácil adaptarlo a las distintas circunstancias. De otro modo es imposible hacerlo durante el desarrollo de la crisis y la integración de los distintos datos deberá hacerse manualmente en el mejor de los casos. En general, la sísmica será la aplicación más crítica, pues es la que maneja mayor volumen de datos y velocidades de adquisición más elevadas. Por ello suele implementarse en los computadores más próximos al sistema de entrada. Las otras aplicaciones suelen instalarse en otras máquinas con acceso más lento. También es frecuente que el análisis de los datos de sísmica requieran utilizar otra máquina para no sobrecargar o perturbar al sistema de adquisición.



**Figura 4-34.** En sistemas de adquisición de datos hay que tener siempre presente que los datos llegan de forma continua y no es posible interrumpir la secuencia. El tiempo necesario para su procesado debe ser mucho menor que el transcurrido entre dos muestras sucesivas. El tiempo de procesado incluye la adquisición, la transferencia a ficheros, la información al usuario y las necesidades propias del sistema. Este último es muy importante y difícilmente controlable en sistemas operativos como el WINDOWS.

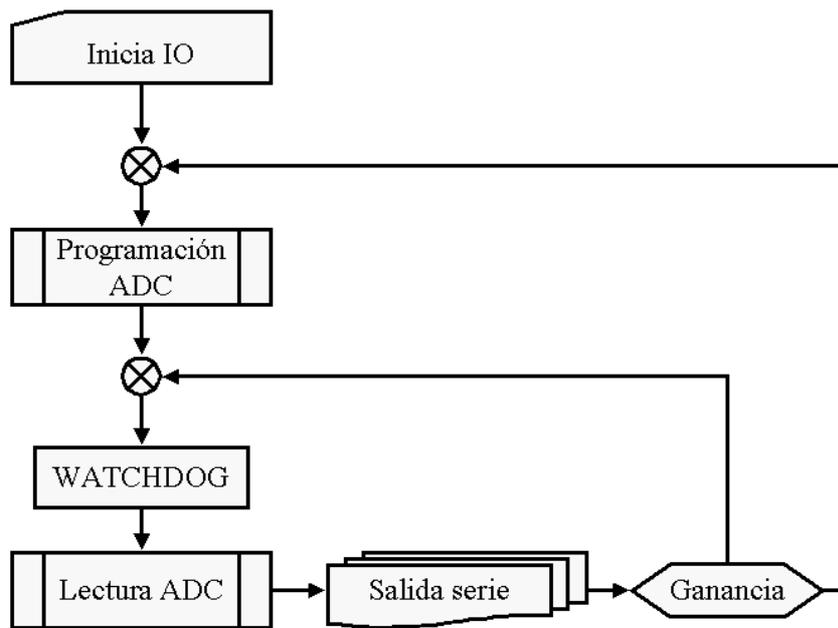
### Sistemas operativos

Se hace necesario conjugar dos realidades, por una parte necesitamos un sistema estable, rápido y que opere en tiempo real, en el que sea fácil desarrollar aplicaciones o modificar las existentes. Pero también que este sistema sea fácilmente manejable por los usuarios, que en caso de crisis puede ser que no todos ellos tengan la formación adecuada para manejar computadores con sistemas específicos. También tenemos que considerar la necesidad de que los sistemas aislados sean de muy bajo consumo y que puedan operarse al aire libre. Desde un punto de vista exclusivamente técnico elegiríamos una máquina UNIX (o uno de sus derivados como LINUX) pero que la mayoría del personal con el que podemos contar como operadores desconocen, en este sentido es preferible utilizar un sistema como el WINDOWS y derivados. Para los sistemas de bajo consumo deberemos utilizar máquinas con sistemas operativos propietarios como el EPOC32. La mejor solución es utilizar sistemas mixtos, donde las partes críticas operen bajo UNIX y reservando el sistema WINDOWS para los computadores de interfase con el usuario no especializado. Ténganse presente que el sistema WINDOWS está especialmente concebido para aplicaciones de ofimática y ocio, siendo difícil su utilización en sistemas de tiempo real, al no permitir la interacción directa con el hardware, al menos de forma sencilla. Sin embargo, no se puede ignorar que todos los usuarios de computadores están familiarizados con su uso.

### Sistemas de microcontrolador

Se presentan, a modo de ejemplo, las funciones básicas para el control de convertidores analógico digitales de diversas tecnologías. En todos los casos se utiliza un microcontrolador PIC16F84 que genera todas las señales necesarias para la correcta operación del convertidor y transfiere los datos en serie de acuerdo con un formato RS232

estándar. Los programas que se presentan en este capítulo están escritos utilizando el nemotécnico propio del lenguaje ensamblador del PIC16F84. Es importante utilizar en todos los programas de adquisición un sistema de reinicio automático (*watchdog*) para evitar que el sistema se quede colgado. Este tipo de dispositivos utilizan un temporizador independiente que debe ser puesto a cero periódicamente, en cuanto se produce el desbordamiento del contador reinicia el sistema. El microcontrolador PIC16F84 lleva incorporada esta función y es necesario sólo incluir la instrucción *clrwdt* después de cada ciclo de medida.



**Figura 4-35.** Diagrama bloque del programa de control de un convertidor analógico digital de tecnología delta sigma. En primer lugar hay que iniciar las líneas de entrada salida (Inicia IO), seguidamente programar el registro de control del convertidor (programación ADC). El ciclo de medida reinicia el WATCHDOG cada vez que va a tomar un dato, lee el registro de datos del convertidor (lectura ADC), transmite los datos (salida serie) y comprueba si hay algún cambio en los parámetros (ganancia).

### Transmisión en serie

En todos los casos se emplea la misma función para la transmisión serie de los datos. El microcontrolador utiliza un cristal de cuarzo de 3.579 MHz que permite obtener con buena precisión los tiempos requeridos para la interfase serie con velocidades de transmisión estándar. Para generar las distintas velocidades (4800, 9600, 19200 y 38400 baudios) se ha escrito un función que produce el retardo necesario mediante un simple contador. En algunas aplicaciones se debe utilizar otra línea para la salida de los datos, pues por necesidades de la realización del circuito impreso, la línea 1 del port B se utiliza para otra función. Igualmente si se utiliza una interfase RS232 como el MAX232 se deberá invertir los niveles de salida (permutar líneas de código `bcf Port_B, DX` y `bsf Port_B, DX`).

### Asignación de líneas

```

; PORT SERIE E/S y velocidad
;

```

```

;CLK 3.579
;4800=.58 9600=.26 19200=.11 38400=.3+nop
;
DX equ 1 ;Port_B
BAUD equ .26

```

### *Salida serie*

```

Xmtr bsf Port_B,DX
movwf XmtReg
movlw 08H
movwf Count1
nop
nop
nop
nop
nop
X_next call Delay
rrf XmtReg,Same
btfss STATUS,CARRY
goto X_1
bcf Port_B,DX
goto X_2
X_1 bsf Port_B,DX
X_2 decfsz Count1,Same
goto X_next
call Delay
bcf Port_B,DX
call Delay
call Delay
retlw 0

```

### *Retardo*

```

Delay movlw BAUD
movwf DlyCnt
red1 decfsz DlyCnt,Same
goto red1
retlw 0

```

### *Programa de control del convertor AD7710 mediante un microcontrolador PIC16F84*

Se presenta las funciones para el control de un convertor AD7710 mediante un microcontrolador PIC16F. Se utiliza un cristal de cuarzo de 9.8304 para poder obtener valores enteros para los divisores correspondientes a las frecuencias de muestreo de 200 Hz (0060H), 100 Hz (00C0H), 50 Hz (0180H) y 25 Hz (0300H), pudiéndose seleccionar entre dos de ellas (bit 3 de GAIN). El convertor funciona en modo continuo, leyéndose el registro de salida cada vez que finaliza una conversión. Los datos se encuentran en las memorias ADC1, ADC2. La amplificación interna del convertor (bits 0, 1, 2) está en la memoria GAIN.

### *Asignación de líneas*

```

DAT equ 0 ;Port_B
DRDY equ 1 ;Port_B
RFS equ 2 ;Port_B
TFS equ 3 ;Port_B
A0 equ 4 ;Port_B

```

```
CLK equ 5 ;Port_B
```

### *Adquisición*

```
adc bcf Port_B,CLK
movlw 10H
movwf Count1
adc0 btfsc Port_B,DRDY
goto adc0
bsf Port_B,A0
bcf Port_B,RFS
nop
adc1 nop
bcf STATUS,CARRY
rlf ADC1,Same
rlf ADC2,Same
btfsc Port_B,DAT
bsf ADC1,0
bsf Port_B,CLK
nop
bcf Port_B,CLK
nop
decfsz Count1,Same
goto adc1
nop
bsf Port_B,RFS
movlw 001H
addwf ADC1,Same
btfsc STATUS,CARRY
incf ADC2,Same
movlw 080H
addwf ADC2,Same
adc2 btfss Port_B,DRDY
goto adc2
retlw 0
```

### *Programación*

```
prog bsf GAIN,3
clrf ADP1
clrf ADP2
clrf ADP3
movf GAIN,W
andlw 00FH
movwf ADP1
bcf STATUS,CARRY
rlf ADP1,Same
rlf ADP1,Same
movlw 001H ; código muestreo
movwf ADP2
movlw 086H ;código muestreo
movwf ADP3
btfss GAIN,4
goto prog2
bcf STATUS,CARRY
movlw 003H
movwf ADP2
movlw 00DH
movwf ADP3
prog2 movlw 18H
movwf Count1
bsf STATUS,RP0
```

```

movlw 0C2H
movwf TRISB
bcf STATUS,RP0
call Reta
bcf Port_B,CLK
bcf Port_B,TFS
bsf Port_B,RFS
bcf Port_B,A0
call Reta
prog1 rlf ADP3,Same
rlf ADP2,Same
rlf ADP1,Same
btfss STATUS,CARRY
bcf Port_B,DAT
btfsc STATUS,CARRY
bsf Port_B,DAT
call Reta
bsf Port_B,CLK
call Reta
bcf Port_B,CLK
call Reta
decfsz Count1,Same
goto prog1
bsf Port_B,DAT
call Reta
bsf STATUS,RP0
movlw 0C3H
movwf TRISB
bcf STATUS,RP0
call Reta
bsf Port_B,TFS
bsf Port_B,RFS
bsf Port_B,A0
bcf GAIN,3
retlw 0

```

### *Retardo*

```

Reta movlw RETADC
movwf DlyCnt
red1 decfsz DlyCnt,Same
goto red1
retlw 0

```

### *Programa de control del conversor ADS1210 mediante un microcontrolador PIC16F84*

Se presenta las funciones para el control de un conversor ADS1210 mediante un microcontrolador PIC16F. Se utiliza un cristal de cuarzo de 9.8304 para poder obtener valores enteros para los divisores correspondientes a las frecuencias de muestreo de 100 Hz y 50 Hz (0180H). El conversor funciona en modo continuo, leyéndose cada vez que finaliza una conversión. Los datos se encuentran en las memorias ADC1, ADC2. La amplificación interna del conversor (bits 0, 1, 2) está en la memoria GAIN. El divisor para 50 muestras por segundo con un cuarzo de 9.8304 MHz es 0186H. El conversor opera con 24 bits de resolución, dejando al programa de explotación la reducción al número de bits deseado. En la función de lectura del conversor (*adc*) se envía primero un comando de lectura y tras una espera equivalente a la transmisión de un byte se leen los tres bytes de datos. Para la programación se envía un comando de programación y tras la espera se envían los cuatro bytes con los parámetros de operación.

### *Asignación de líneas*

```
SDOUT equ 0 ;Port_A I
DRDY equ 1 ;Port_A I
SDIO equ 2 ;Port_A O/I
SCLK equ 3 ;Port_A O
```

### *Adquisición*

```
Adc btfsc Port_A,DRDY
    goto adc
    movlw 0C0H
movwf ADP1
movlw 008H
movwf Count1
padc1 rlf ADP1,Same
btfss STATUS,CARRY
bcf Port_A,SDIO
btfsc STATUS,CARRY
bsf Port_A,SDIO
bsf Port_A,SCLK
call Reta
bcf Port_A,SCLK
call Reta
decfsz Count1,Same
goto padc1
movlw 008H
movwf Count1
padc2 call Reta
call Reta
decfsz Count1,Same
goto padc2
movlw 018H
movwf Count1
adc1 bcf STATUS,CARRY
rlf ADC1,Same
rlf ADC2,Same
rlf ADC3,Same
bsf Port_A,SCLK
call Reta
btfsc Port_A,SDOUT
bsf ADC1,0
bcf Port_A,SCLK
call Reta
decfsz Count1,Same
goto adc1
retlw 0
```

### *Programación*

```
prog btfss Port_A,DRDY
goto prog
prog1 btfsc Port_A,DRDY
goto prog1
movlw 064H
movwf ADP1
movlw 0C2H
movwf ADP2
movf GAIN,W
andlw 007H
movwf ADP3
bcf STATUS,CARRY
```

```

rif    ADP3,Same
rif    ADP3,Same
movlw  001H    ; constante
movwf  ADP4
movlw  07FH    ;constante
movwf  ADP5
movlw  008H
movwf  Count1
movlw  002H
movwf  Count2
prog2  rif     ADP5,Same
rif    ADP4,Same
rif    ADP3,Same
rif    ADP2,Same
rif    ADP1,Same
btfss  STATUS,CARRY
bcf    Port_A,SDIO
btfsc  STATUS,CARRY
bsf    Port_A,SDIO
bsf    Port_A,SCLK
call   Reta
bcf    Port_A,SCLK
call   Reta
decfsz Count1,Same
goto   prog2
movlw  008H
movwf  Count1
prog3  call   Reta
call   Reta
decfsz Count1,Same
goto   prog3
movlw  020H
movwf  Count1
decfsz Count2,Same
goto   prog2
retlw  0

```

### *Retardo*

```

Reta  movlw 008H
movwf Count3
Reta1 nop
decfsz Count3,Same
goto  Reta1
retlw 0

```

### *Programa de control del conversor MAX186 mediante un microcontrolador PIC16F84*

Se presenta las funciones para el control de un conversor MAX186 mediante un microcontrolador PIC16F. Se trata de un conversor de 12 bits de resolución, 8 canales de entrada y salida serie. Este conversor es muy útil para equipar pequeños sistemas multiparamétricos, como puede ser una estación meteorológica, donde no se requiere una elevada resolución. Como este tipo de conversores son muy rápidos, los datos no se almacenan en el microcontrolador, sino que se transmiten inmediatamente al sistema de adquisición de datos.

### *Asignación de líneas*

```

DOUT equ 3 ;Port_B

```

```

SCLK equ 4 ;Port_B
CS equ 5 ;Port_B
DIN equ 6 ;Port_B
SSTRB equ 7 ;Port_B

```

### *Adquisición*

```

adc    bcf    Port_B,CS
      bsf    Port_B,DIN
      bsf    Port_B,SCLK
      bcf    Port_B,SCLK
      btfsc  Canal,0
      bsf    Port_B,DIN
      btfss  Canal,0
      bcf    Port_B,DIN
      bsf    Port_B,SCLK
      bcf    Port_B,SCLK
      btfsc  Canal,2
      bsf    Port_B,DIN
      btfss  Canal,2
      bcf    Port_B,DIN
      bsf    Port_B,SCLK
      bcf    Port_B,SCLK
      btfsc  Canal,1
      bsf    Port_B,DIN
      btfss  Canal,1
      bcf    Port_B,DIN
      bsf    Port_B,SCLK
      bcf    Port_B,SCLK
      bcf    Port_B,DIN ;bipolar
      bsf    Port_B,SCLK
      bcf    Port_B,SCLK
      bsf    Port_B,DIN ;entrada single
      bsf    Port_B,SCLK
      bcf    Port_B,SCLK
      bsf    Port_B,DIN ; internal clock
      bsf    Port_B,SCLK
      bcf    Port_B,SCLK
      bcf    Port_B,DIN ;internal clock
      bsf    Port_B,SCLK
      bcf    Port_B,SCLK
      bcf    Port_B,DIN
movlw  010H
movwf  Contar
      clrf  ADCL
      clrf  ADCH
adc2   btfss  Port_B,SSTRB
      goto  adc2
adc3   bsf    Port_B,SCLK
      bcf    Port_B,SCLK
      bcf    STATUS,CARRY
      rlf   ADCL,Same
      rlf   ADCH,Same
      btfsc  Port_B,DOOUT
      bsf    ADCL,LSB
      decfsz Contar,Same
      goto  adc3
      bsf    Port_B,CS
      retlw 0

```

## Software para computadores PC

El software para el sistema de computadores depende lógicamente de cada uno de los tipos de datos que lleguen al computador y lo que se quiera hacer con ellos. Sin embargo, hay una parte común que es la entrada de los datos en el sistema. En general, esa función se realiza a través de una puerta serie, aunque ya en sistemas más grandes pueda hacerse mediante un puerto USB, utilizando una interfase serie RS232 a USB. También pueden utilizarse otro tipo de interfases, sin embargo la interfase serie es la más sencilla de implementar en el hardware externo, especialmente en los sistemas de telemetría radio o cable. Una vez los datos han entrado en el computador allí son procesados por la misma aplicación que gestiona la entrada o remitidos como mensajes UDP o TCP/IP a otras aplicaciones. El problema más común es como gestionar adecuadamente el puerto serie, pues este tipo de función no está suficientemente documentada en la mayor parte de libros de programación, ya que la tendencia actual del desarrollo computacional es la ofimática y el ocio, donde no se plantea el problema de la adquisición de datos.

### Gestión del puerto serie en DOS

En este sistema se dispone del control absoluto del puerto serie. El procedimiento consiste en activar la interrupción del puerto serie con los parámetros de comunicación deseados (identificación del puerto, velocidad, número de bits, bits de parada y paridad) y cada vez que llega un byte se produce una interrupción que transfiere el control a una función para su procesamiento.

```
void interrupt com_int(...)
{
    disable();
    if((inportb(portbase_IIR) & RX_MASK)==RX_ID)
    {
        if(((endbuf + 1) & SBUFSIZ - 1)==startbuf)
            SError = BUFOVFL;
        ccbuf[endbuf++] = inportb(portbase_RXR);
        endbuf &= SBUFSIZ - 1;
    }
    outportb(ICR, EOI);
    enable();
}

int serial_out(char x)
{
    while((inportb(portbase_LSR)&XMTRDY)==0)
        disable();
    outportb(portbase_TXR,x);
    enable();
    return(0);
}

int chkccb(void)
{
    return(abs(endbuf-startbuf));
}

char read_byte(void)
```

```

{
char res;
  disable();
  res = ccbuf[startbuf++];
  startbuf %= SBUFSIZ;
  enable();
  return(res);
}

int initserial(void)
{
char c;
int divisor,setting,pnum;
switch(port)
{
  case COM1:
    portbase = COM1BASE;
    break;
  case COM2:
    portbase = COM2BASE;
    break;
  default :
    return(-1);
}
portbase_LCR = portbase + LCR;
portbase_IIR = portbase + IIR;
portbase_RXR = portbase + RXR;
portbase_MSR = portbase + MSR;
portbase_MCR = portbase + MCR;
portbase_LSR = portbase + LSR;
portbase_TXR = portbase + TXR;
portbase_IER = portbase + IER;
if(speed==0)return(-1);
else divisor = (int)(115200L/speed);
if(portbase==0) return(-1);
disable();
c = inportb(portbase_LCR);
outportb(portbase_LCR, (c | 0x80));
outportb(portbase + DLL,(divisor & 0x00FF));
outportb(portbase + DLH,((divisor >> 8) & 0x00FF));
outportb(portbase_LCR, c);
enable();
if(portbase==0) return(-1);
if(bits < 5 || bits > 8) return(-1);
if(stopbits != 1 && stopbits != 2) return(-1);
if(parity !=NO_PARITY&&parity !=ODD_PARITY&&parity !=EVEN_PARITY)return(-1);
setting = bits-5;
setting |= ((stopbits==1)? 0x00 : 0x04);
setting |= parity;
disable();
outportb(portbase_LCR, setting);
enable();
endbuf = 0;
startbuf = 0;
oldvects[0] = getvect(0x0B);
oldvects[1] = getvect(0x0C);
setvect(0x0B,com_int);
setvect(0x0C,com_int);
pnum = (portbase==COM1BASE ? COM1 : COM2);
disable();

```

```

c = inportb(portbase_MCR) | MC_INT;
outportb(portbase_MCR, c);
outportb(portbase_IER, RX_INT);
c = inportb(IMR) & (pnum==COM1 ? IRQ4 : IRQ3);
outportb(IMR, c);
enable();
c = inportb(portbase_MCR) | DTR | RTS;
outportb(portbase_MCR, c);
return 0;
}

void closeserial(void)
{
int c;
disable();
c = inportb(IMR) | ~IRQ3 | ~IRQ4;
outportb(IMR, c);
outportb(portbase_IER, 0);
c = inportb(portbase_MCR) & ~MC_INT;
outportb(portbase_MCR,c);
enable();
outportb(portbase_MCR,0);
setvect(0x0B,oldvects[0]);
setvect(0x0C,oldvects[1]);
}

```

## Gestión del puerto serie en WINDOWS 9x

En este sistema operativo, no se tiene acceso directo al puerto, sino que se abre un fichero con las características del puerto y en ese fichero se van acumulando los datos que llegan al puerto. Hay que ir leyendo los datos de este fichero para evitar que se produzca un desbordamiento. Las funciones siguientes proporcionan un buen control sobre las comunicaciones serie en Windows 9x, deben hacerse cambios para que trabajen en Windows 2000. También pueden utilizarse controladores adaptados a los distintos lenguajes y sistemas de desarrollo de software. Además, los buffer deben ser muy grandes, pues estos sistemas operativos pueden estar varios segundos sin atender una determinada aplicación.

```

HANDLE hComm = NULL;
TRead *ReadThread;
COMMTIMEOUTS ctmoNew = {0}, ctmoOld;

void __fastcall TRead::Execute()
{
    DWORD dwError,dwEvent;
    COMSTAT cs;
    FreeOnTerminate = true;
    SetCommMask(hComm, EV_RXCHAR);
    while(1)
    {
        while(1)
        {
            if(Terminated)return;
            ClearCommError(hComm,&dwError,&cs);
            if(cs.cbInQue)ReadPort();
            else break;
        }
        if(WaitCommEvent(hComm,&dwEvent,NULL))
    }
}

```

```

    {
        if(dwEvent&EV_RXCHAR)ReadPort();
    }
}

__fastcall TRead::TRead(bool CreateSuspended)
    : TThread(CreateSuspended)
{
}

void __fastcall inicia_serie(void)
{
    char inicia_port[32];
    DCB dcbCommPort;
    sprintf(inicia_port,"COM%i",port)

    hComm=CreateFile(inicia_port,GENERIC_READ|GENERIC_WRITE,0,0,OPEN_EXISTING,0,0)
;
    if(hComm == INVALID_HANDLE_VALUE)
    {
        MessageDlg("Problems in Serial PORT, Programm
Abort",mtError,TMsgDlgButtons()<<mbOK,0);
    }
    else
    {
        GetCommTimeouts(hComm,&ctmoOld);
        ctmoNew.ReadIntervalTimeout = MAXDWORD;
        SetCommTimeouts(hComm,&ctmoNew);
        dcbCommPort.DCBlength = sizeof(DCB);
        GetCommState(hComm,&dcbCommPort);
        sprintf(inicia_port,"%i,N,8,1",baudios);
        BuildCommDCB(inicia_port,&dcbCommPort);
        SetCommState(hComm,&dcbCommPort);
        ReadThread = new TRead(false);
    }
}

void __fastcall ReadPort(void)
{
    DWORD dwBytesRead;
    char InBuff[2000];
    ReadFile(hComm,InBuff,999,&dwBytesRead,NULL);
    .....
}

```

## Gestión del puerto serie en EPOC32

En este sistema operativo, no se tiene acceso directo al puerto, sino que se abre un fichero con las características del puerto y en ese fichero se van acumulando los datos que llegan al puerto. La lectura se realiza en bloques de la longitud deseada, de esta forma es muy fácil deshacer los paquetes de datos, leyendo primero el byte correspondiente a la cabecera y después a la identificación. Seguidamente se leen de dos en dos los bytes correspondientes a los datos y finalmente el byte de fin de ráfaga.

```

PROC rsset:(hComm%,baud%,parity%,data%,stop%,hand%,term&)
    LOCAL frame%,srchar%(6),dummy%,err%

```

```

frame% = data% -5
IF stop%=2 :frame%=frame% OR 16 :ENDIF
IF parity% :frame%=frame% OR 32 :ENDIF
srchar%(1)=baud% OR (baud%*256)
srchar%(2)=frame% OR (parity%*256)
srchar%(3)=(hand% AND 255) OR $1100
srchar%(4)=$13
REM iniciación de la puerta serie
POKEL ADDR(srchar%(5)),term&
Err%IOW(hComm%,7,srchar%(1),dummy%)
IF err% :RAISE err% :ENDIF
ENDP

REM leer un buffer en puerta serie
bufferlen% = 1
address& = ADDR(buffer$)
ret% = IOREAD(hComm%,UADD(address&,1),bufferlen%)

REM escribir un buffer en puerta serie
IOWRITE(hComm%, UADD(address&,1),bufferlen%)

```

## Recomendaciones

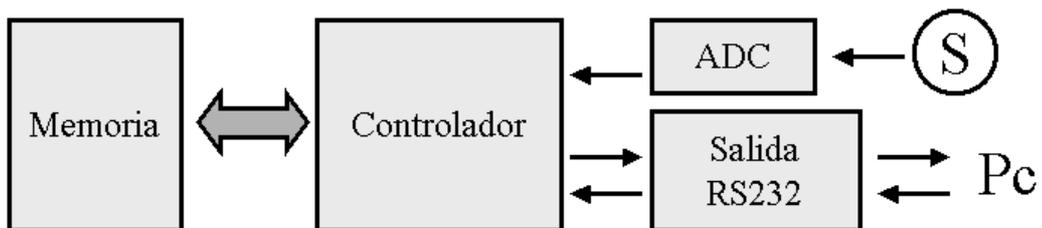
Estas funciones están estrechamente ligadas a un desarrollo concreto. Cualquier cambio, por pequeño que sea, implica modificaciones importantes en el software de control, por ello deben considerarse como simples ejemplos. Para evitar tener que estar escribiendo siempre las mismas funciones es importante realizar los diseños procurando respetar al máximo las asignaciones de entrada y salida. Es necesario consultar la información sobre los distintos lenguajes de programación y realizar muchos ensayos hasta poder construir las funciones que realmente se ajustan a nuestras necesidades. En general se encuentran bastante bien documentados los sistemas de programación para microcontroladores, sin embargo es difícil encontrar buenos ejemplos para las aplicaciones de adquisición de datos en computadores operando con WINDOWS.

La transferencia de datos al disco es función del tipo de computador, del sistema operativo y del lenguaje utilizado. Las opciones más frecuentes son escribir los datos uno a uno o en bloques, que por facilidad suelen hacerse con los datos de un segundo o de un minuto, de esta forma es fácil mantener el sincronismo temporal, pues cada actualización del fichero se hace con los datos correspondientes a un segundo exacto. Un método para hacer esto es ir almacenando los datos en una matriz, al momento de transferir los datos al disco se ajusta el número de datos, suprimiendo o interpolando datos. En general, se pierden (o sobran) unos pocos datos por minuto debido a interferencias en telemetría radio o por desajustes en las velocidades de muestreo de los conversores analógico digitales. De esta forma, cada fichero contiene el mismo número de datos, y el interpolar o suprimir un dato no supone ningún problema para los análisis posteriores.

## ELEMENTOS AUXILIARES

### Sistemas Autónomos de adquisición de datos

En muchas ocasiones se requieren sistemas autónomos que permitan almacenar un número relativamente grande de datos con muy bajo consumo. Como ejemplos típicos de aplicación de estos sistemas se puede citar la medida de temperatura, deformación, nivel del agua en pozos, gases, propiedades del agua etc. En general, se trata de aplicaciones en las que son suficientes unos pocos datos por hora y canal y no es imprescindible un acceso inmediato a los datos. En el seguimiento de la actividad volcánica estos sistemas se utilizan para monitorear volcanes en estado estacionario, donde es suficiente con analizar la evolución de los datos con periodicidades de semanas o meses. En otros casos, cuando el volumen de datos es muy elevado o se requiere el acceso en tiempo real a los mismos, la mejor solución es utilizar un computador, donde están resueltas todas las cuestiones de gestión de comunicaciones y de almacenamiento masivo de la información.

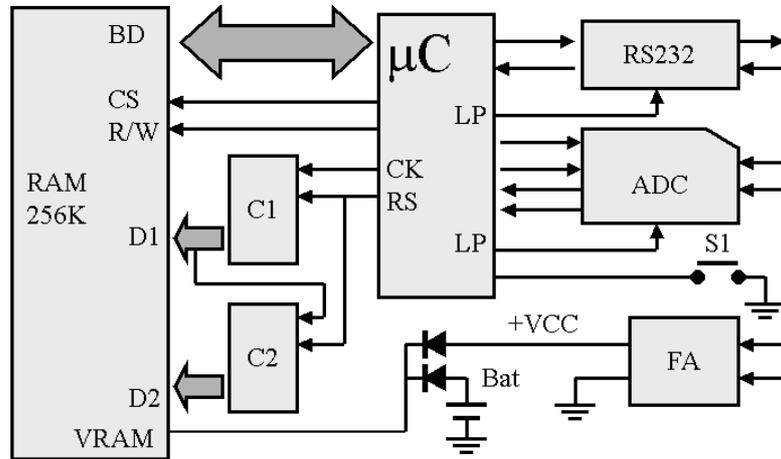


**Figura 5-1.** Diagrama bloque de un sistema de almacenamiento de datos. Consta de una memoria, un controlador, un conversor analógico digital para la entrada de los datos y una interfase para el computador.

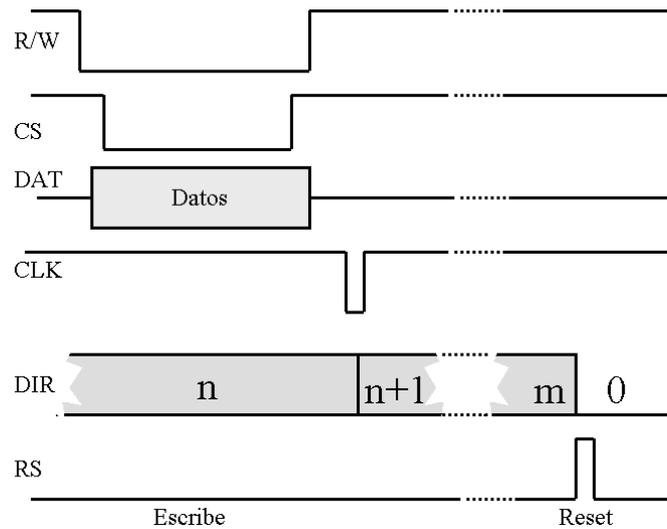
### Sistemas autónomos de almacenamiento de datos

En el diseño de estos sistemas deben cuidarse especialmente dos aspectos, el consumo y la operación en condiciones extremas, pues se trata de instrumentos que deberán permanecer operando durante mucho tiempo en zonas aisladas en entornos muy agresivos. Un sistema para el almacenamiento de datos está constituido por una memoria, un controlador y un conversor analógico digital para el acceso a la señal suministrada por los sensores. Además deberá poseer una interfase para comunicarse con los sistemas de tratamiento de datos (en general un computador). Para su diseño se partirá estableciendo cual deberá ser su capacidad de almacenamiento, pues este factor condiciona el tipo de memoria a utilizar y, en consecuencia, el controlador necesario. Téngase presente que cuanto mayor sea la memoria más elevado será el consumo, pues al requerido por la memoria deberá añadirse el debido al sistema de control que se complica proporcionalmente. El siguiente paso es elegir el conversor analógico digital, en función de la resolución necesaria y el número de canales. Finalmente se debe optar por el sistema de interfase con el computador y si éste se integra en el sistema de adquisición o bien es independiente, con conexión manual cada vez que se desee

utilizar. Finalmente se diseña la fuente de alimentación, teniendo cuidado en proteger la integridad de los datos frente a fallos en la alimentación principal.



**Figura 5-2.** Sistema de adquisición de datos que utiliza una memoria RAM estática de gran capacidad. La dirección de escritura / lectura se obtiene mediante un contador C1 y C2. De esta forma se puede utilizar un pequeño microcontrolador.

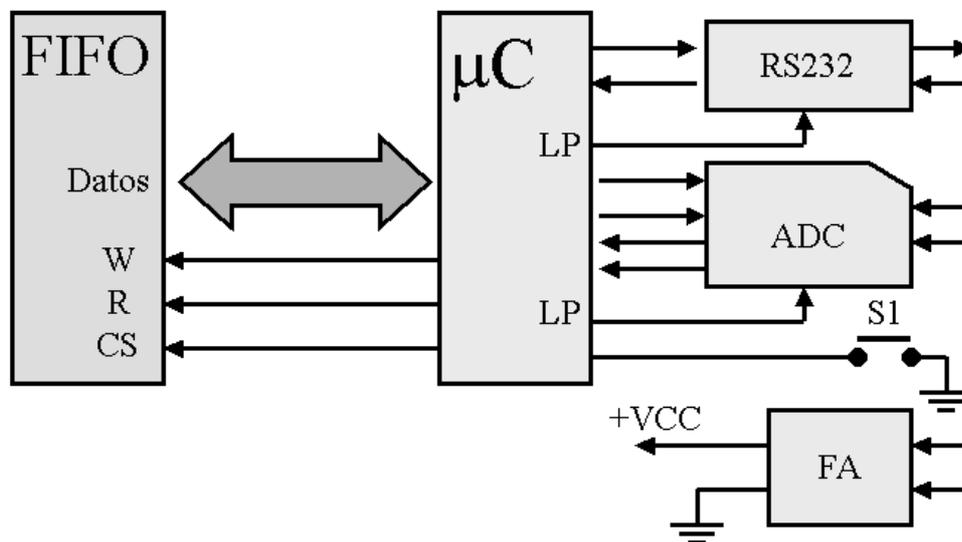


**Figura 5-3.** Señales para el control de una memoria RAM. RW permite seleccionar el modo escritura o lectura de una celda. La bajada de la línea CS ejecuta la operación de escritura (RW = 0) o de lectura (RW = 1). En el caso de una operación de escritura los datos deben estar disponibles en la puerta de la memoria antes de la bajada de CS. En caso de lectura los datos están disponibles inmediatamente después de bajar CS. Seguidamente se envía un pulso (CLK) para incrementar la dirección (DIR). Un pulso en RS lleva a cero a los contadores (RESET).

### Almacenamiento de datos mediante una memoria RAM

Una solución sencilla es utilizar una memoria RAM estática de gran capacidad. El problema es que a este tipo hay que suministrarle la dirección de la celda que se va a leer o escribir, cuando la capacidad de la memoria crece, se necesitan cada vez más líneas para las direcciones (18 para una memoria de 256K) por lo que se requiere un

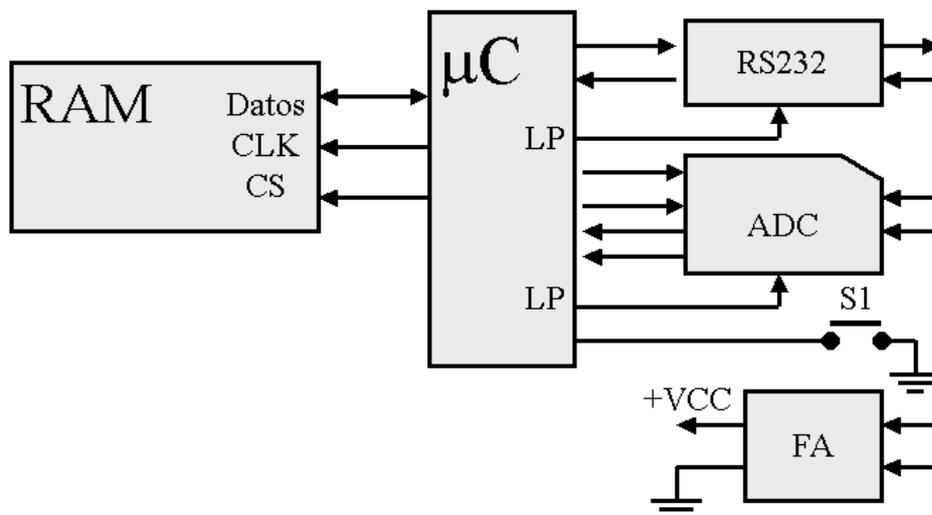
microcontrolador con un elevado número de puertas. Como el acceso a las celdas de memoria es siempre secuencial, se puede utilizar unos contadores binarios (como el CMOS 4040) para obtener las direcciones, de esta forma se descarga al microcontrolador de esta labor y se puede utilizar un dispositivo más pequeño y de menor consumo. Después de cada operación de escritura se envía un pulso al contador de forma que se selecciona la celda siguiente. Cuando se desea leer los datos se reinician los contadores (RESET) y con ello se selecciona la primera celda. El microcontrolador obtiene el dato del conversor analógico digital y lo escribe en memoria, una vez finalizado un ciclo de medida pasa el sistema a modo de bajo consumo hasta la siguiente toma. Con esta técnica es fácil construir sistemas de adquisición de datos con capacidades superiores a 1 Mbyte. Para acceder a la memoria el microcontrolador debe disponer de al menos de un puerto de 8 líneas para entrada salida de datos y 2 líneas de control. Además, 3 o 4 líneas para el conversor analógico digital y 2 para conexión con el computador. En total se requiere al menos de 16 líneas de entrada salida.



**Figura 5-4.** Utilización de una memoria FIFO para la construcción de un pequeño sistema de adquisición de datos.

### Otras soluciones

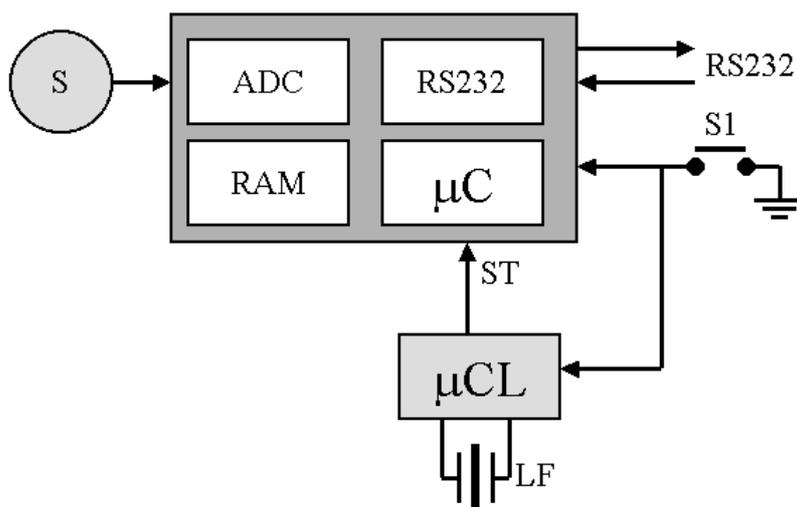
Cuando no se requiere un número muy elevado de datos es posible utilizar otras soluciones, por ejemplo una memoria FIFO permite construir fácilmente un sistema de adquisición con unos pocos miles de datos. Para ello es suficiente con conectar directamente la entrada / salida de datos de la memoria FIFO a la puerta del microcontrolador. Cada vez que se envía (o lee) un dato la memoria incrementa automáticamente la dirección. Otra posibilidad para pequeños sistemas es utilizar memorias de acceso serie. Estas memorias poseen interfaces muy sencillas que sólo requieren dos o tres líneas de control, por lo que el sistema es muy simple. Sin embargo, no hay disponibles memorias de este tipo de gran capacidad. La disponibilidad de memorias de este tipo con tecnologías EEPROM o FLASH permite desarrollar sistemas que retienen los datos aún en el caso de un fallo en la alimentación. Esta solución permite el desarrollo con microcontroladores muy pequeños.



**Figura 5-5.** Sistema de adquisición con una memoria RAM de acceso serie. Al sólo requerir dos o tres líneas de control el sistema es muy sencillo.

### Control del ciclo de medida

En general, este tipo de dispositivos se diseñan para que adquieran un dato cada cierto tiempo, permaneciendo en reposo entre cada toma. Para disminuir el consumo es conveniente pasar todos los dispositivos, incluido el controlador, a modo espera. Cada vez que hay que tomar un dato se debe despertar al controlador para que ejecute la operación y vuelva al modo reposo. Para ello la mejor solución es utilizar otro microcontrolador, de muy baja potencia, que actúa a modo de reloj despertador. La operación con un cristal de muy baja frecuencia (32768 Hz) disminuye aún más el consumo de este dispositivo. También puede utilizarse un reloj que disponga de capacidad de generar interrupciones.



**Figura 5-6.** Utilización de un segundo microcontrolador operando a muy baja frecuencia para iniciar los ciclos de medida. De este modo, el microcontrolador principal puede ponerse en modo de espera y disminuir el consumo.

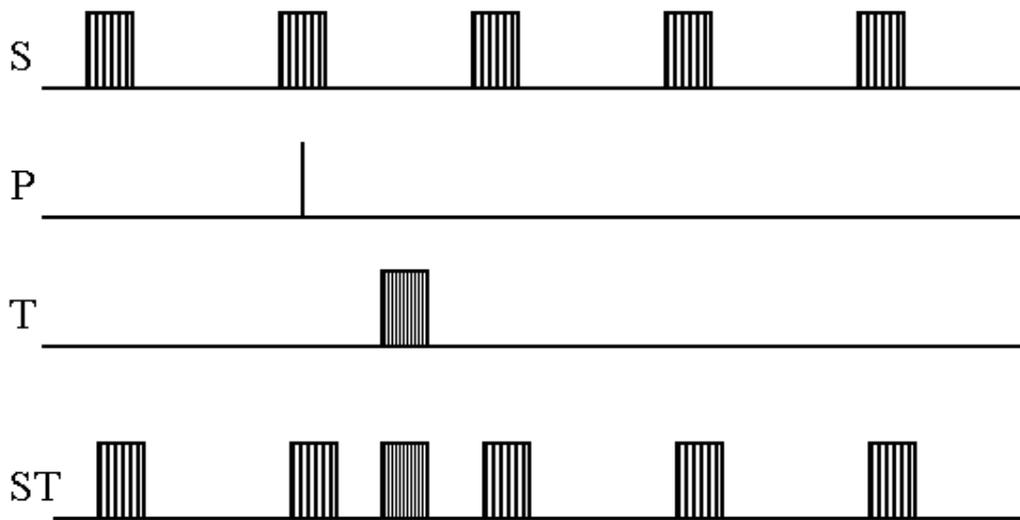
Finalmente, la conexión al computador suele hacerse a través de una puerta serie (RS232). Para la conexión puede utilizarse un modo de selección automático, al detectar una entrada en el adaptador serie o bien manual mediante un conmutador específico. El primer método es más sencillo de operar, si bien requiere un poco más de energía y pueden producirse fallos por entrada de ruido. El segundo método permite desconectar completamente el circuito de interfase. La fuente de alimentación debe diseñarse cuidadosamente, de poco sirve disminuir el consumo de todo el sistema si la fuente de alimentación presenta un bajo rendimiento. Actualmente es posible utilizar elementos que operen satisfactoriamente a 3V. La alimentación puede hacerse utilizando directamente dos pilas alcalinas de 1.5V. Además, es conveniente incluir una pila de litio que impida la pérdida de datos durante el cambio de las baterías principales.

### **Sistemas de tiempo absoluto. Sincronización horaria mediante GPS.**

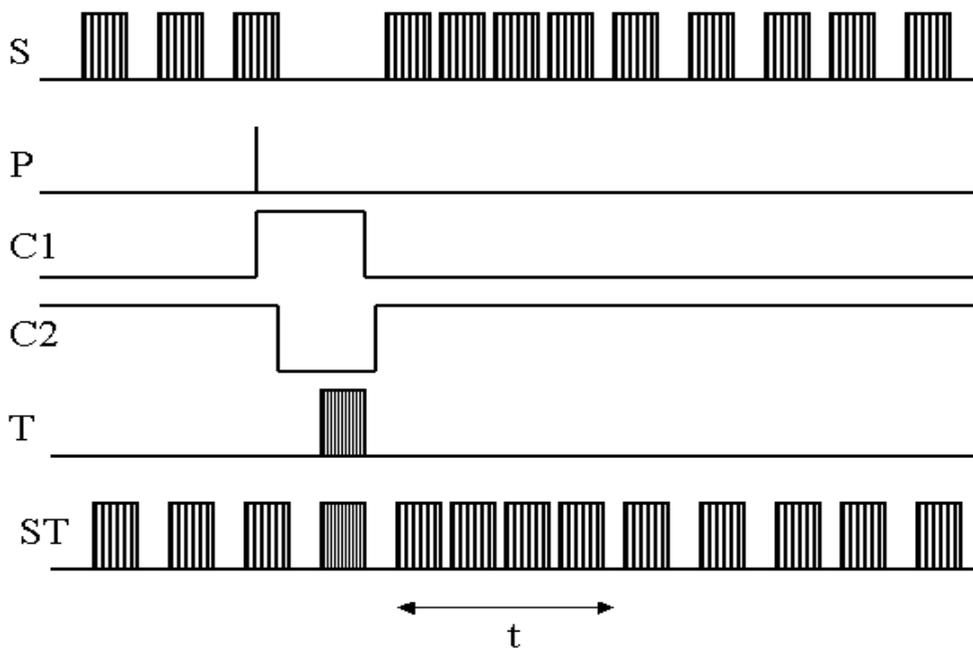
La base para la interpretación de los registros de una red sísmica es disponer de tiempo preciso. Sin embargo hasta hace muy pocos años, esta era la cuestión más difícil de solucionar cuando se diseñaba una estación sísmica. La única posibilidad de sincronismo horario eran las señales horarias transmitidas por distintas estaciones de radiodifusión. Mientras bastaba con una indeterminación del orden de un segundo era suficiente una sincronización manual diaria del reloj del observatorio. Sin embargo, sincronizar mejor de un segundo era ya una cuestión muy difícil. La disposición de emisoras de señales horarias solucionó el problema en los países más desarrollados (HBG en Suiza, DCF en Alemania y MSF en Inglaterra). Sin embargo, fuera de las zonas de sincronización el tiempo seguía siendo un problema grave. La utilización de señales no horarias, pero de cobertura mundial, como las señales de navegación Omega o Loran C, permitía sincronizar equipos y mantener la hora, pero no la puesta en hora del reloj. Solo la popularización del sistema GPS ha permitido, a precio abordable, superar el problema de la hora, de forma que ya hoy el sistema de tiempo no es la cuestión más difícil y costosa de una estación sísmica.

### **Sistema de tiempo GPS**

El sistema de tiempo que presentamos se ha desarrollado a partir de un módulo GPS Trimble de bajo consumo LASSEN II, pero es fácilmente adaptable a cualquier sistema GPS que disponga de una señal de pulso por segundo accesible y una interfase para el ordenador. Sea cual sea el receptor GPS elegido, siempre deberemos desarrollar una interfase para poderlo adaptar a las necesidades de dar tiempo a una estación sísmica. Hay muchas soluciones, siendo la más eficaz utilizar un sistema de microproceso específico para ello. Aunque es posible introducir directamente la señal del GPS en un computador por un puerto dedicado, esto no funciona correctamente en el sistema operativo Windows, pues este sistema no permite gestionar directamente y de forma sencilla las interrupciones. Los sistemas GPS todavía presentan un consumo relativamente importante, por lo que debe ser posible desconectarlo, trabajando con un reloj interno durante un cierto tiempo y volviendo a realizar un sincronismo cuando la estima de la deriva del reloj supera los límites prefijados.



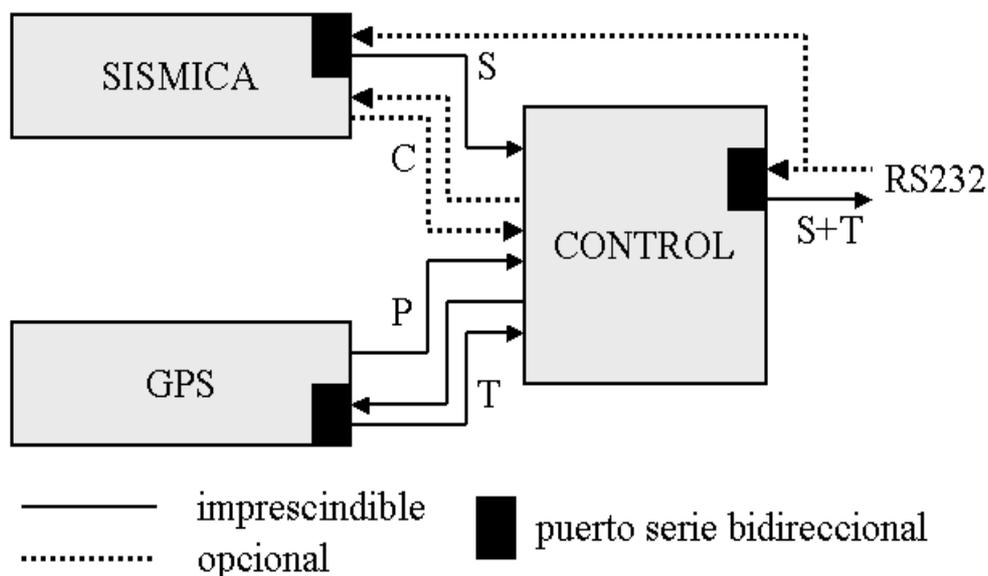
**Figura 5-7.** Intercalación de la información horaria (T) en la trama de datos sísmicos (S). Al recibirse el pulso de segundo (P) se espera que se termine de transmitir el dato sísmico y seguidamente se transmite el código horario. La velocidad de transmisión debe ser suficientemente grande para que no haya problemas de colisión. Si es necesario trabajar a bajas velocidades (9600 baudios o menor) la solución es eliminar un dato sísmico sustituyéndolo por el código horario.



**Figura 5-8.** Cuando se integra el receptor GPS en el propio sistema de adquisición es posible transmitir el código de tiempo dentro de la misma secuencia sísmica, simplemente interrumpiendo la transmisión de datos sísmicos (S) en coincidencia con el pulso de segundo (P) y añadir el mensaje de tiempo (T). Seguidamente continúa la transmisión de datos sísmicos, con una ligera variación en el intervalo de transmisión. Nota: La velocidad de muestreo no se modifica, simplemente los datos se almacenan en memoria durante la transmisión del tiempo.

## Circuito adaptador

Los sistemas GPS proporcionan un mensaje serie que contiene la información horaria que no en todos los modelos está sincronizado con el pulso de segundo. Por este motivo antes de adquirir un receptor GPS debe comprobarse que exista una salida con el pulso de segundo o el mensaje esté sincronizado. En estas condiciones es sencillo realizar un adaptador para proporcionar una buena referencia horaria a un sistema sísmico. Hay dos soluciones: integrar directamente el sistema GPS en el módulo de adquisición, es decir el sistema proporciona directamente una trama serie con una cabecera que contiene la información horaria seguida por los datos sísmicos. Esta solución exige que el receptor GPS esté físicamente junto al sistema de adquisición, lo cual supone un mayor consumo en la estación que puede ser problemático en algunos sistemas telemétricos. La otra solución es intercalar en la trama serie de los datos de sísmica la información horaria, esto requiere que el intervalo entre dos datos sea lo suficientemente grande para que no se produzca colisión entre ellos. Otra posibilidad es eliminar un dato sísmico y sustituirlo por el mensaje de tiempo.

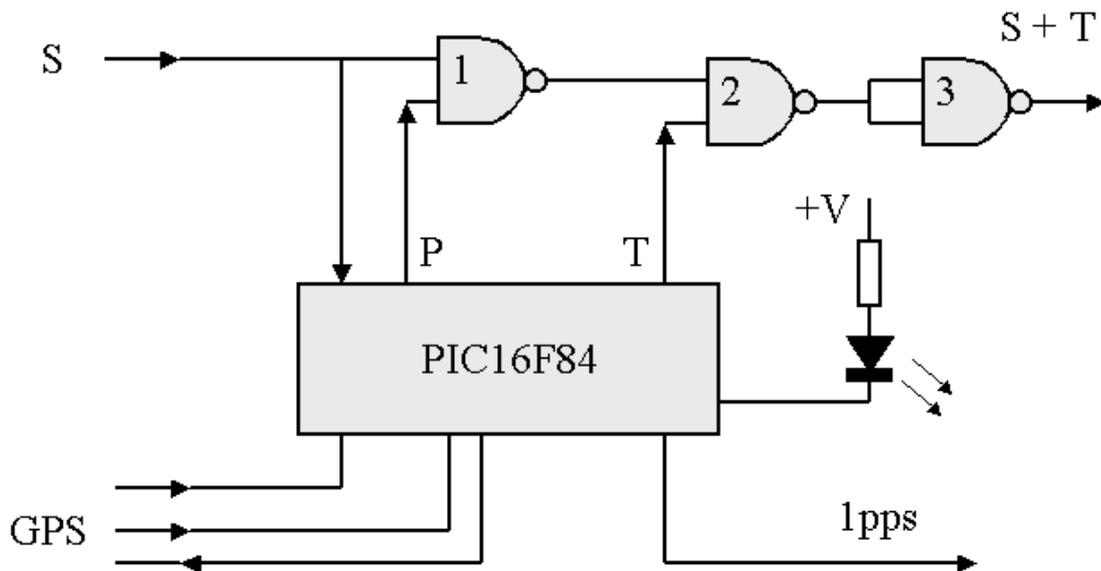


**Figura 5-9.** Un sistema de control recibe la información del receptor GPS y del sistema sísmico. La conexión con el receptor GPS es bidireccional (T) y además recibe el pulso de segundo (P) que provoca una interrupción en el controlador. La conexión con el sistema sísmico puede ser unidireccional (S) o bidireccional para permitir el ajuste de los parámetros mediante software. Para el control hardware del flujo de datos sísmicos se dispone de dos líneas extras de control (C) que permiten al sistema de adquisición sísmico saber cuando debe interrumpir la transmisión de datos para dar paso al mensaje de tiempo.

## Intercalación del código de tiempo en la serie de datos sísmicos

El microcontrolador del sistema GPS mantiene un canal serie con el receptor GPS, recibiendo el pulso de segundo mediante una interrupción hardware. De esta forma, cada segundo el microcontrolador pide al receptor GPS el estado y el mensaje de tiempo. Si ambos son correctos, prepara una trama con esta información que es transmitida después del siguiente flanco de segundo. Para ello escucha la secuencia sísmica, esperando reconocer el carácter de fin de mensaje después del flanco de segundo

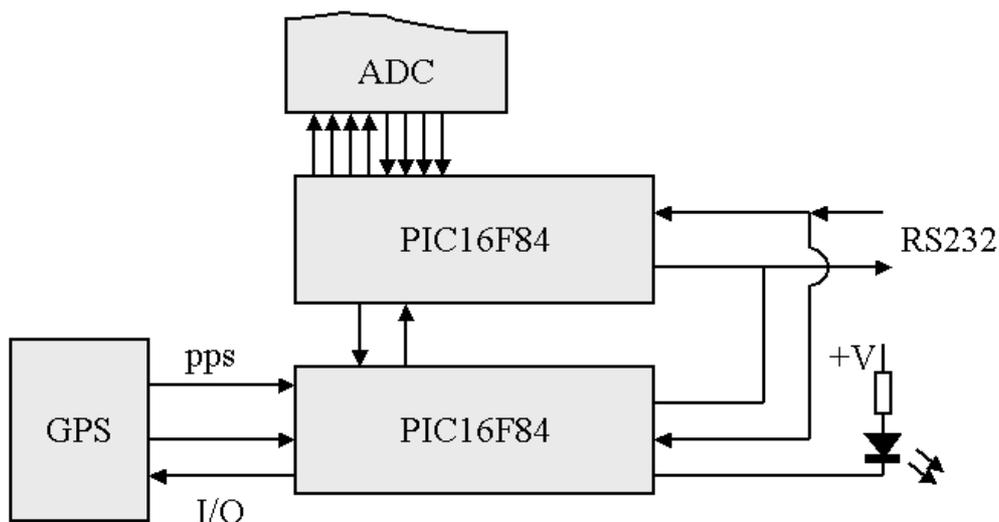
e inmediatamente transmite el tiempo. Para ello se ha añadido una puerta AND que permite transmitir alternativamente los datos sísmicos y el tiempo. Si el intervalo entre datos sísmicos no es suficiente para evitar la colisión se suprime un dato sísmico y en su lugar se transmite el tiempo. La ventaja de este sistema es que puede intercalarse en cualquier punto entre el sistema de adquisición y el computador de almacenamiento. Esto es muy importante en redes con telemetría radio, ya que es suficiente un único receptor GPS para dar tiempo a toda la red, intercalando en cada canal el tiempo en forma sincrónica. Lógicamente, habrá que utilizar un circuito de interfase para cada canal, aunque todos ellos comparten el mismo GPS.



**Figura 5-10.** Circuito utilizado para intercalar un código de tiempo en una secuencia de datos de sísmica (S). El microcontrolador PIC16F84 escucha la trama sísmica reconociendo cada final de dato, en este momento cierra la puerta (P 1) y transmite el tiempo (T 2). A la salida de la puerta (3) tenemos la trama compuesta con tiempo y datos sísmicos. Además se proporciona una salida de pulso de segundo de 10 ms de anchura.

### Integración de un receptor GPS en un sistema de adquisición

Se trata de un módulo de tres componentes realizado mediante tres conversores delta – sigma controlados por un microcontrolador PIC16F84. A este módulo se le incorpora otro microcontrolador PIC16F84 que mantiene un canal serie con el receptor GPS, recibiendo el pulso de segundo mediante una interrupción. De esta forma, cada segundo el microcontrolador pide al receptor GPS el estado y el mensaje de tiempo. Si ambos son correctos se prepara una trama con esta información que es transmitida en coincidencia con el flanco del siguiente segundo. El microcontrolador de adquisición interrumpe la transmisión de datos para permitir la transmisión del código de tiempo. Para ello ambos microcontroladores están comunicados mediante dos líneas de control, para avisar de que hay trama de tiempo dispuesta a ser transmitida (de sistema GPS a sistema sísmico) y la autorización para hacerlo (de sistema sísmico a sistema GPS).

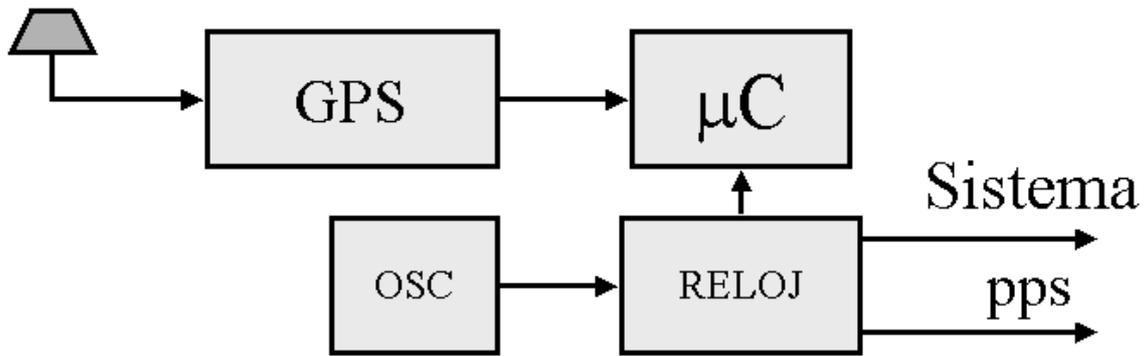


**Figura 5-11.** Cuando el receptor GPS se puede disponer en el propio sistema de adquisición es posible integrar el código horario directamente en la secuencia sísmica. Para ello el microcontrolador del sistema GPS avisa al microcontrolador del sistema sísmico de que ha llegado un flanco de segundo y debe transmitir el código de tiempo. El sistema sísmico interrumpe la transmisión para permitir la salida del código de tiempo.

### Corrección de tiempo

En general cuando se inicia el sistema de registro, el reloj local posee un importante error con respecto al tiempo absoluto. En unos pocos minutos el GPS habrá conseguido la sincronización y en ese momento puede iniciarse el registro de los datos. Sin embargo, es posible que durante el registro se pierda la señal GPS o bien el sistema que suministra los datos presente algún tipo de fallo. En estas circunstancias se producen pequeños errores de tiempo, generalmente de unas pocas muestras. La mejor forma de corregirlos es suprimir o intercalar muestras linealmente, de esta forma la corrección no afecta significativamente a la forma de onda y puede hacerse rápidamente.

Otra solución consiste en disponer en la estación un oscilador de alta precisión y corregir las posibles derivas mediante el GPS cuando éste tenga muy buena recepción. La corrección se puede hacer sin saltos, pues una vez sincronizado tras el arranque, la diferencia de tiempo entre el GPS y el reloj será siempre muy pequeña y pueden utilizarse técnicas de enganche en fase. El sistema puede diseñarse de forma que durante los periodos de muy buena recepción se pueda calcular la deriva, calculando los coeficientes de un polinomio de ajuste que permite seguir corrigiendo el reloj durante los periodos de mala recepción. Sin embargo, el circuito se complica y aumenta el consumo considerablemente. Esta solución sólo es recomendable para grandes instalaciones, donde un reloj proporciona hora a todo el sistema y no existen limitaciones energéticas. Téngase presente que es necesario un oscilador local de muy alta precisión y estos módulos tienen un precio muy elevado cuando se requieren estabilidades superiores a  $10^{-7}$ . Un simple cálculo permite estimar la precisión que se requiere al oscilador para mantener una centésima de segundo durante una hora: El número de centésimas de segundo en una hora es  $60 \times 60 \times 100 = 360000$  lo que significa garantizar una estabilidad superior a  $1/500000$  ( $2 \times 10^{-6}$ ).



**Figura 5-12.** Para compensar los fallos de recepción del GPS se puede utilizar un reloj controlado por un oscilador de alta precisión (OSC) que se corrige continuamente mientras hay buena recepción.

### Determinación de las coordenadas de la estación

En algunos casos es interesante poder operar el sistema GPS en el modo convencional, como es poder conocer las coordenadas de la estación sísmica. Sin embargo, a las velocidades normales de transmisión esto no es posible en el sistema de intercalación de código. En este caso, la solución es disponer de un conmutador que permita bloquear la información sísmica y operar el GPS en modo normal. En el caso de sistema integrado GPS – Sísmica es posible transmitir las coordenadas cada cierto tiempo, por ejemplo cada cinco minutos, y de esta forma no sobrecargar el sistema. Dado que los códigos horarios se intercalan en la misma secuencia sísmica, el incluir también las coordenadas no supone pérdida de datos. Es necesario disponer de memoria suficiente para almacenar los datos sísmicos durante casi un segundo, es decir a 50 muestras por segundo, tres canales y 16 bits son 300 bytes. La eliminación en el año 2000 de la perturbación selectiva en la información del sistema GPS hace posible que con receptores de bajo precio se puedan alcanzar resoluciones centimétricas. Esto hace que sea interesante transmitir también en tiempo real la información GPS.

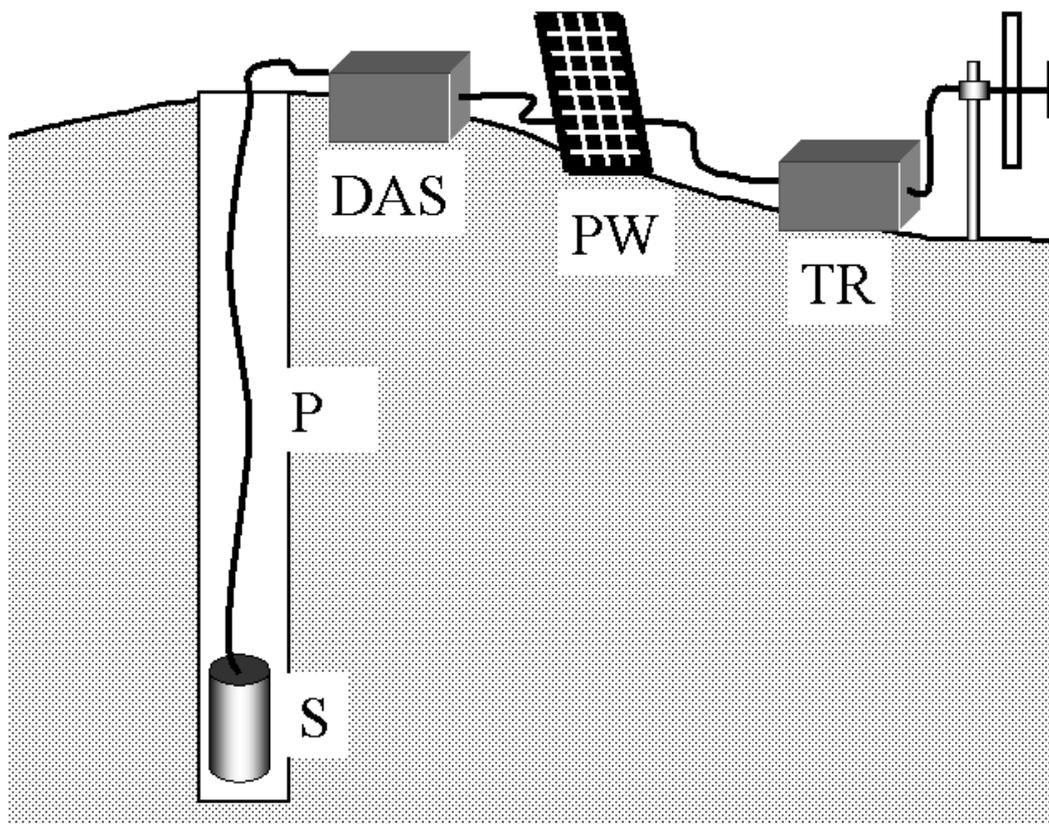
### Relojes de cuarzo

Son muchas las ocasiones no se requiere la precisión de un sistema de tiempo basado en un receptor GPS, como son todas las aplicaciones con velocidades de muestreo inferiores al minuto. En estos casos es suficiente el empleo de un reloj de cuarzo. El empleo de un reloj supone dos ventajas sobre el sistema GPS, por un lado el requerimiento energético es mucho menor, pues se pasa de un consumo de 100 mA por término medio a menos de 1 mA y no se requiere antena exterior lo que disminuye considerablemente los fallos, tanto por causas naturales como por actos vandálicos. Un cuarzo de uso común posee una estabilidad nominal de 100 ppm; para un modelo específico para relojes es de 20 ppm y para uno compensado en temperatura es de sólo 2.5 ppm. Es decir un cuarzo de uso común no garantiza el segundo por hora, mientras que un cuarzo de reloj es posible mantener derivas de un segundo por día y con un cuarzo compensado en temperatura mantiene casi el segundo por mes. En sistemas de registro sísmico es posible utilizar un sistema mixto cuarzo GPS, de forma que el GPS calibra cada cierto tiempo el reloj de cuarzo, esto permite diseñar sistemas portátiles de extraordinario bajo consumo, aunque hay que utilizar lógicamente un cuarzo

compensado. En sistemas de adquisición de datos lentos es mejor separar el reloj de cuarzo del sistema de adquisición, de esta forma es posible mantener el consumo a niveles extraordinariamente bajos.

### Instrumentación situada en pozos

En general, en las áreas volcánicas activas nos encontramos los instrumentos con niveles de ruido muy altos, esto es debido a que las capas más superficiales son materiales muy jóvenes y poco consolidados y además con elevado contenido en agua. Igualmente, las perturbaciones térmicas se propagan muchos metros por debajo de la topografía. La mejor solución consiste en situar los instrumentos enterrados bajo varias decenas o centenas de metros, utilizando galerías, cuevas o sondeos. En las galerías y cuevas el único problema puede ser la presencia de gases tóxicos que dificulten la entrada del personal técnico para hacer el mantenimiento. Sin embargo, en los pozos el problema es la imposibilidad de mantener los equipos pues toda avería es irreparable. La única posibilidad es hacer un nuevo pozo. Por ello debemos cuidar especialmente durante el diseño del sistema la vida esperable del instrumento, aunque por ello debamos sacrificar otras cualidades.



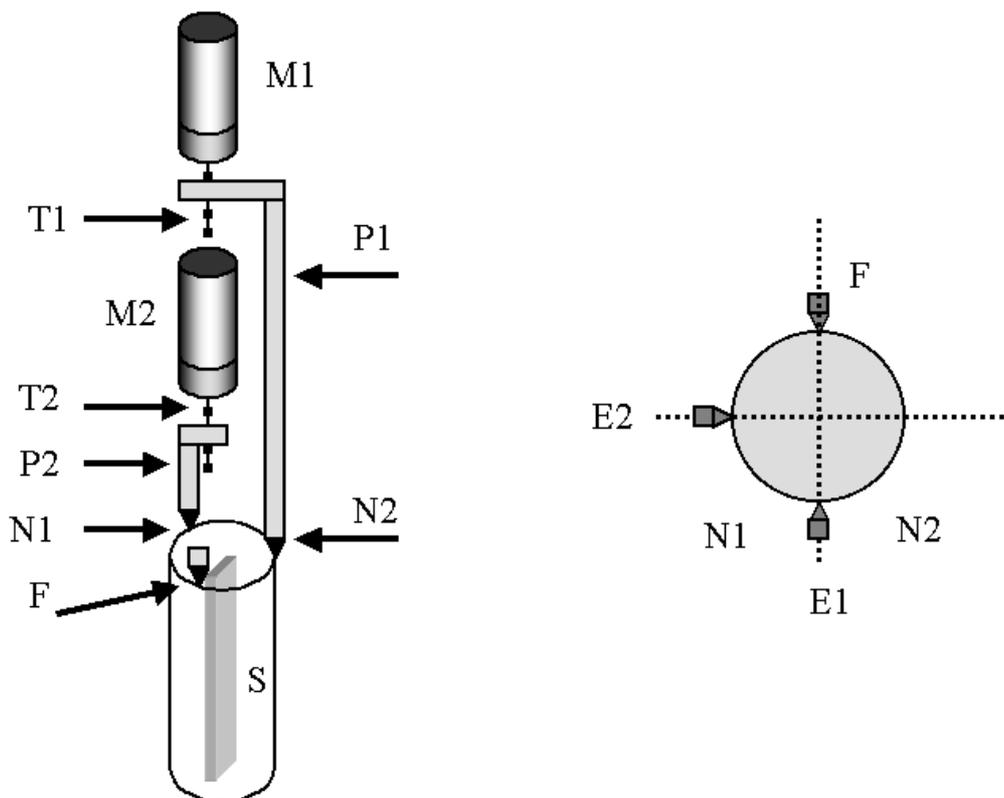
**Figura 5-13.** La instalación en sondeos permite mejorar la relación señal / ruido en todos los parámetros, sin embargo no es posible realizar operaciones de mantenimiento en los instrumentos. Una instalación típica consta de un sistema de sensores (S) situados en el interior de un sondeo (P), unidos por cable a una electrónica (DAS) situada a boca de pozo, un sistema de energía (PW) y opcionalmente una telemetría (TR).

## Instalación de los Sensores

Son muchos los sensores que pueden disponerse en el interior de un sondeo, teniendo siempre presente la limitación de tamaño impuesta por el diámetro de perforación, en general inferior a 10 cm.

Los sensores más utilizados son:

- Sismómetros.
- Clinómetros.
- Extensómetros.
- Dilatómetros.
- Termómetros.
- Piezómetros.
- Gases.



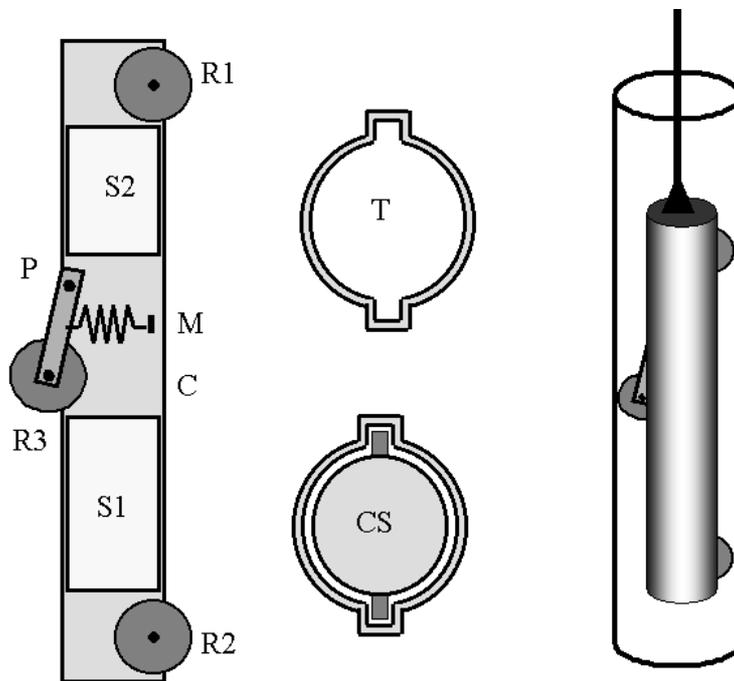
**Figura 5-14.** Sistema de nivelación. Dos pequeños motores (M1 y M2) con reductor actúan sobre dos tornillos (T1 y T2) y mediante un juego de palancas (P1 y P2), unidas al contenedor del sensor (S) mediante uniones flexibles (N1 y N2), permiten producir pequeños desplazamientos en el contenedor del sensor que puede pivotar alrededor de un punto fijo (F). Este sistema permite actuar sobre los dos ejes (E1 y E2), según se activen los respectivos motores.

En general habrá que optar por componentes de un determinado tamaño, lo que ya supone una limitación en la elección del sensor, que igual no es el ideal en cuanto a respuesta o sensibilidad. Un ejemplo puede ser un sensor sísmico, difícilmente éste podrá ser de banda ancha y se deberá utilizar un sensor de alta frecuencia con expansión de respuesta. La segunda limitación es que deberemos elegir sensores con vida media entre

fallos (MTB) superior a varios años de operación, pues de otra forma es muy fácil que se produzca una avería y no pueda ser reparada. Un año equivale a 8760 horas, por lo que deberemos elegir componentes con MTB superiores a 100.000 horas. Por ejemplo, una lámpara de incandescencia tiene 5.000 horas, por lo cual es muy difícil diseñar un detector de CO<sub>2</sub> del tipo absorción de infrarrojos para que opere durante cinco años en un sondeo.

El siguiente problema es el emplazamiento de los sensores en el interior del sondeo. Los sondeos, especialmente los más profundos, no son perfectamente verticales, ni su diámetro se mantiene constante, es por ello muy difícil garantizar la verticalidad de los sensores y su orientación absoluta. El poco espacio disponible dificulta el diseño de mecanismos que permitan corregir la verticalidad. La complejidad del dispositivo de nivelación obliga a que todos los sensores estén contenidos en un sólo módulo que permita la nivelación conjunta del sistema.

El siguiente problema es la fijación del conjunto de sensores solidariamente a la pared del sondeo. En general es muy difícil poder extraer de nuevo los instrumentos, ya que el sondeo se deforma, especialmente en medios como el volcánico donde alternan niveles muy compactos con otros fuertemente fracturados o muy plásticos. Además, cualquier pequeño desprendimiento (u objeto que caiga dentro del sondeo) imposibilita el acceso al nivel de los instrumentos. Sólo en sondeos de poca profundidad (decenas de metros) es factible diseñar el sistema de forma que pueda extraerse fácilmente. En estos casos la mejor solución es entubar el sondeo con un tubo ranurado o de sección cuadrada, de forma que sirva de guía a la cápsula que contiene el conjunto de los sensores.



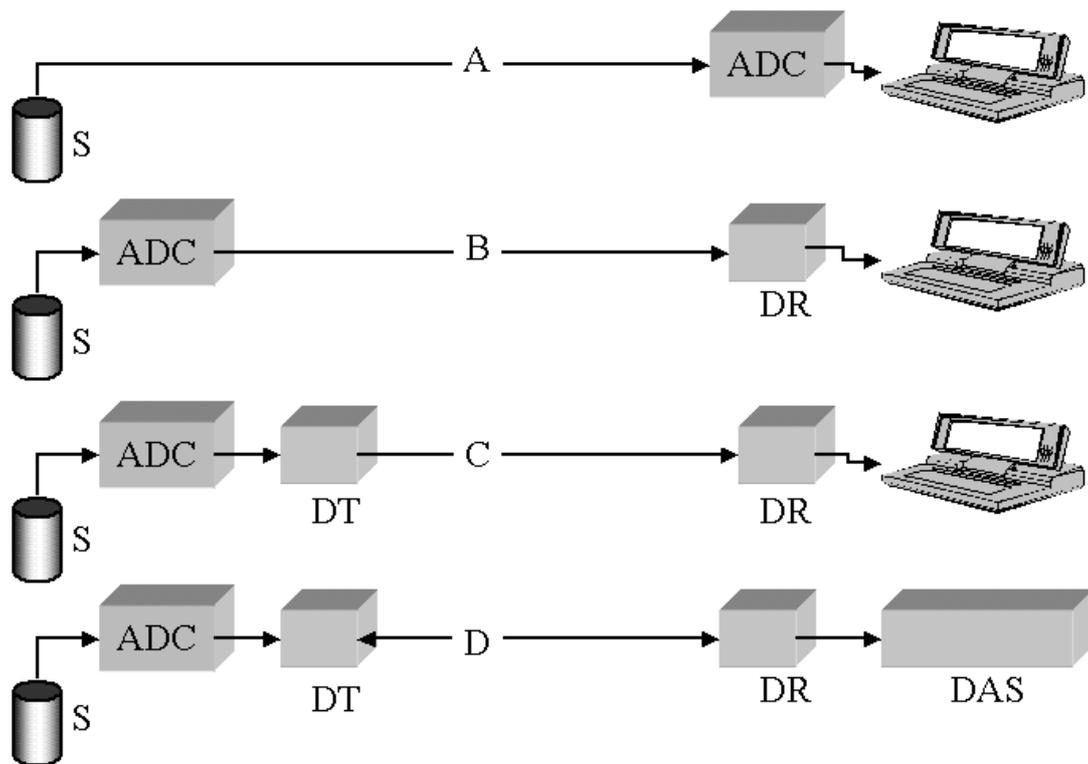
**Figura 5-15.** Cápsula para la introducción de sensores en un sondeo de poca profundidad. El sondeo está entubado con un tubo ranurado (T), dentro del cual se desplaza la cápsula (CS), guiada por un sistema de tres ruedas, dos de ellas fijas (R1 y R2), mientras que un sistema de palanca (P) y muelle (M) empuja la tercera (R3) contra la guía. Los sensores y electrónica están contenidos en S1 y S2.

En sondeos de gran profundidad lo mejor es aceptar que los instrumentos son irrecuperables. En este caso la cápsula se fija mediante un lodo de fraguado lento y no

corrosivo. Téngase presente que algunos cementos atacan al aluminio, por lo que deberemos construir la cápsula en acero y protegerla con pinturas adecuadas. Es importante tener presente la presión a la que va a estar sometido todo el sistema (para el agua es 1 atmósfera cada 10 m). La orientación de la cápsula en sondeos pequeños viene determinada por la ranura del entubado, pero en sondeos grandes esto no es posible, pues aunque entubáramos el sondeo con este tipo de tubería, no hay ninguna garantía que en el fondo la tubería mantenga la misma orientación, pues es muy fácil que en el proceso de descenso se produzcan rotaciones. Una solución es utilizar una brújula electrónica, pero esto no es viable en terrenos volcánicos, donde la imanación remanente de las rocas no coincide con el campo magnético actual. Lo mejor es utilizar un sensor sísmico de tres componentes y calibrar la orientación analizando la polarización de sismos lejanos.

### Acceso a los datos

En general, disponemos de los sensores situados a una cierta profundidad dentro de un sondeo y un cable que nos permite recibir los datos en superficie. La conexión puede ser unidireccional o bidireccional, utilizando dos o cuatro líneas para el enlace, con una interfase RS485 si se desean altas velocidades de comunicación y baja potencia o un módem para velocidades medias. Esta segunda opción tiene la ventaja de reducir el número de cables necesarios para un enlace bidireccional, aunque aumenta la complejidad del sistema y el consumo.

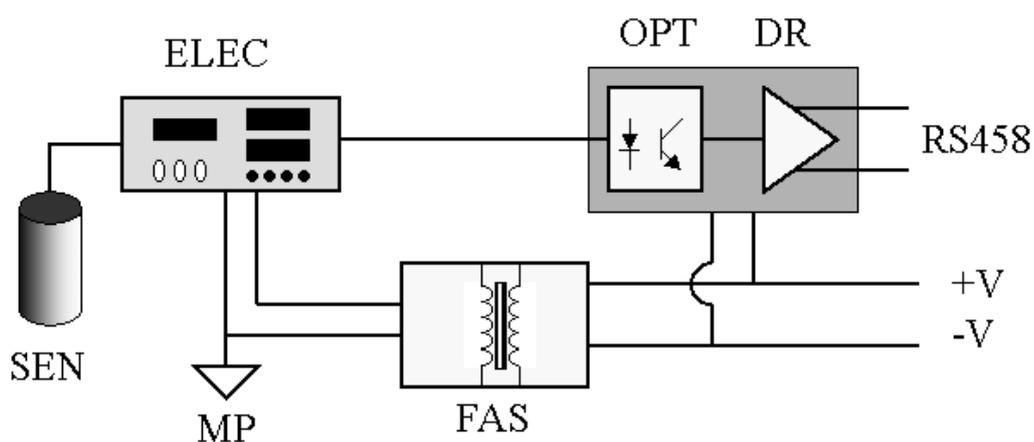


**Figura 5-16.** A) conexión directa, toda la electrónica esta en superficie. B) los electrónica de adquisición está junto a los sensores, conexión directa a un Pc en superficie. C) se utiliza un circuito de aislamiento galvánico entre la electrónica y las líneas de transmisión. D) se utiliza un sistema de almacenamiento de datos o de telemetría sin Pc.

Lo mejor es diseñar el sistema de forma que se utilicen el menor número de conductores, compatible con la velocidad de transmisión necesaria para las velocidades de muestreo requeridas en cada sensor. La solución más sencilla es situar toda la electrónica en superficie y conectar directamente los sensores. Esta solución funciona razonablemente bien, incluso a varios cientos de metros, con sensores pasivos, como son los geófonos de alta frecuencia o termómetros, pero es inviable con sensores activos como los inclinómetros. La siguiente posibilidad es situar los preamplificadores, circuitos de excitación y conversores analógico digital junto a los sensores, mandando por una línea serie los datos a un Pc situado en superficie a boca de pozo. Con cables muy largos siempre aparecen importantes diferencias de potencial entre sus extremos, procedentes de inducciones de las líneas de energía o potenciales derivados de fenómenos electroquímicos, termoeléctricos o corrientes telúricas. Para evitar estas interferencias es conveniente que los sensores estén aislados galvánicamente de las líneas de transmisión. Para ello, lo mejor es utilizar opto-acopladores en los dos extremos de la línea de datos y fuentes de alimentación conmutadas y aisladas.

### Protecciones

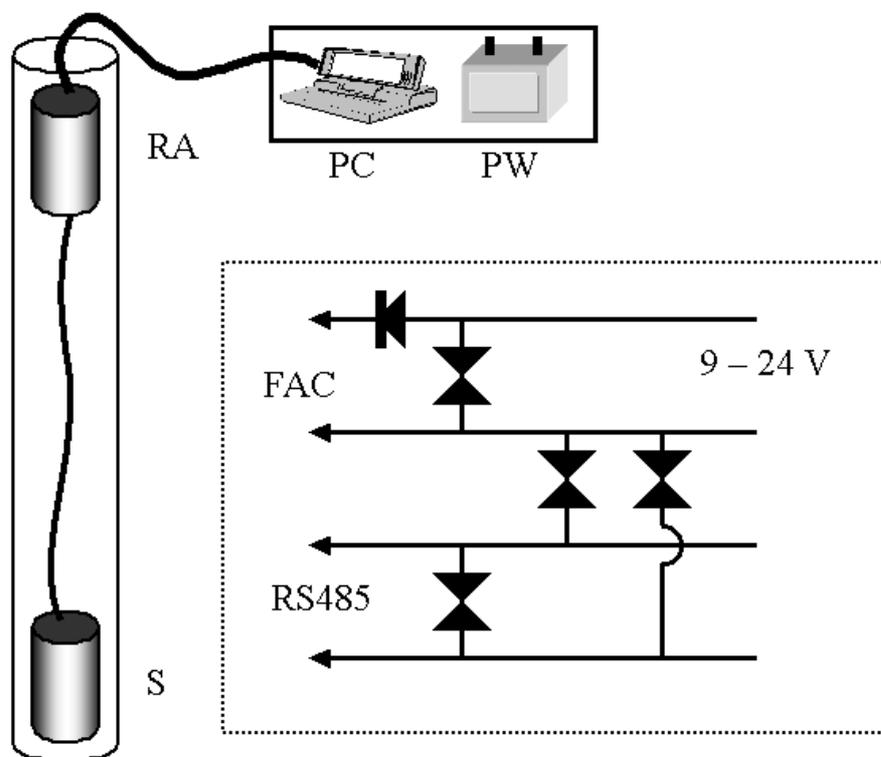
Además es necesario proteger todas las entradas contra transitorios. Hay que pensar que es preferible excederse en la protección de todos los componentes electrónicos que van dentro del pozo, antes que cualquier transitorio provoque su destrucción y por ello quede inutilizado el sondeo. Para ello, se deberán utilizar diodos de protección contra sobretensiones en todas las entradas a la cápsula que contiene los sensores, además de incluir los diodos de protección contra inversión de polaridad. Es importante situar parte de la electrónica de recepción de datos en el interior de la parte superior del sondeo, pues de esta forma se reducen las inducciones por rayos. De esta forma si se produce un transitorio de alta tensión es muy probable que los daños queden reducidos a la electrónica situada en la parte superior y por ello accesible para su reparación.



**Figura 5-17.** Es conveniente aislar la línea de datos y alimentación de la electrónica de los sensores y del sistema de adquisición. Para ello la mejor solución es utilizar opto-aisladores y fuentes de alimentación conmutadas. La figura muestra el circuito de salida del sistema de sensores: (ELEC) es la electrónica de los sensores (SEN), (FAS) una fuente de alimentación conmutada y aislada, (OPT) el opto-aislador y (DR) una interfase RS485

## Cables de conexión

Este es un punto muy importante, pues el cable que une la cápsula que contiene los sensores con la electrónica situada en superficie es uno de los elementos más débiles del sistema. En primer lugar debe poder resistir su propio peso, lo cual se vuelve cada vez más difícil a medida que aumenta la profundidad del pozo. En cuanto se superan unos pocos centenares de metros se hace imprescindible utilizar cables dotados de alma de acero para evitar su rotura. Si el sondeo está lleno de agua o lodo, aumenta su resistencia a la rotura, pero disminuye su aislamiento. Además el cable deberá ser resistente al agua y a otros elementos, como pueden ser en las áreas volcánicas los derivados del azufre o del cloro. Otro punto débil del sistema es la entrada del cable en la cápsula, especialmente si el pozo (o su parte baja) esta lleno de agua o lodo. Téngase presente la elevada presión que puede encontrarse a fondo de pozo.



**Figura 5-18.** Esquema del circuito de protección para las líneas de datos RS485 y de alimentación. Todos los diodos son del tipo especial para supresión de transitorios. Este circuito se repite en los dos extremos del cable. La instalación en el pozo se hace de forma que el cable de conexión con los sensores empieza dentro del pozo, en cuya cabecera se disponen las protecciones superiores y el sistema de aislamiento.

## Sistemas de comunicaciones

Una red instrumental para la vigilancia de la actividad de un volcán esta formada por una serie de sensores separados por una distancia más o menos grande, de las unidades auxiliares de adquisición de datos y un centro de control, donde se registran y procesan los datos. Esta estructura esta soportada por una compleja malla de comunicaciones en

la que se mezclan distintas técnicas y que habitualmente no es de concepción homogénea. Las redes de vigilancia se montan a lo largo de muchos años y difícilmente pueden estar soportadas por una misma tecnología. En una red nos vamos a encontrar con varios tipos de enlaces, aunque en general se siguen utilizando enlaces analógicos en frecuencia modulada, soportados por un enlace radio en VHF o UHF o bien por una línea telefónica. Este último caso está desapareciendo rápidamente dado el alto coste de las líneas punto a punto, aunque sigue siendo una opción a considerar cuando es posible instalar un cable privado de unos pocos kilómetros. Hoy en día, las tecnologías digitales están lo suficientemente desarrolladas para que se pueda realizar o modernizar una red de forma relativamente económica, pudiéndose utilizar los mismos sensores.

### Técnicas de transmisión de datos

Un aspecto muy importante a considerar para el seguimiento y evaluación inmediata de los fenómenos volcánicos es el relativo al sistema de comunicaciones que permita la centralización y acceso inmediato a todos los datos disponibles. Existe actualmente un amplio desarrollo en tecnologías de la comunicación, pero con un coste demasiado elevado para su aplicación en regiones de riesgo volcánico moderado o para vigilar volcanes que no están en crisis; sin embargo, un cuidadoso estudio de las diferentes opciones permite aprovechar las ventajas que ofrecen las distintas tecnologías con un coste razonable. Telefonía móvil o fija, radio enlaces VHF, UHF y *spread spectrum* o satélite son algunas de estas tecnologías, a las que se debe añadir la conexión a la red INTERNET para el acceso remoto y múltiple a los datos.

El siguiente cuadro recoge las técnicas de transmisión de datos más utilizadas en el seguimiento de la actividad volcánica, sus ventajas, sus principales problemas y si son susceptibles de fallar en el curso de una crisis. Lógicamente, a todos los sistemas les llega un momento en el que pueden fallar, pero con algunas tecnologías, por su propia concepción, hay seguridad de que fallarán durante la crisis. En particular todos los sistemas de telefonía fallan por saturación, incluso aún en el caso improbable de que no sufra daños la propia red telefónica. Los sistemas que precisan una gran demanda de energía fallan al fallar el suministro de energía eléctrica. No es posible alimentar durante días el sistema con baterías y más aún, se deben mantener en buen estado las baterías durante años. Los enlaces radio presentan el problema de la saturación de frecuencias y el elevado número de operadores piratas que ocupan incluso las frecuencias reservadas oficialmente.

Sistemas de comunicación				
Tipos de enlaces	Baudios	Eficacia	Principales problemas	Fallo en crisis
Línea telefónica	33000	Eficaz.	Costes muy elevados	Sí
Telefonía celular	9600	Poco eficaz.	Costes elevados. No siempre existe cobertura.	Sí.
Cables (pares trenzados)	115000 (RS485)	Muy eficaz en distancias de pocos Km.	Deben instalarse con cuidado para evitar	No

Fibra óptica	1000000	Mayor capacidad de transmisión.	Roturas. Se deben proteger de los animales.	
Radio VHF	4800	Es la tecnología más empleada. Bajo coste.	Muchas interferencias. El espectro está muy saturado. Dificultad de obtener licencias.	No
Radio UHF	33000			
Técnicas spread spectrum	115000 no siempre alcanzable	Nueva tecnología, muy eficaz.	No esta autorizado su uso en todos los países. Elevado requerimiento energético.	No, salvo fallo en la alimentación.
Satélite (continuo)	Depende del precio	Muy eficaz. La capacidad del enlace sólo depende del precio.	Coste prohibitivo en equipos y operación. Elevado requerimiento energético	No, salvo fallo en la alimentación.
Satélite (mensajes)	1200	Muy eficaz.	Muy limitado el volumen de datos.	No
Redes locales	>1000000 no siempre alcanzable	Tráfico de datos en el ámbito del centro de proceso de datos	Debe diseñarse con cuidado, el fallo de un ordenador origina la caída de todo el sistema.	No
Internet	Mucho menor de lo esperado	Transferencia de datos entre investigadores o centros. Económico.	No siempre se puede garantizar la recepción correcta de los datos.	Sí. Sin ninguna duda.

La tecnología de enlaces digitales *frecuencia libre* o *spread spectrum* permite la implementación de redes de intercambio de datos de forma simple y eficiente. El sistema se basa en módulos bidireccionales (transmisor y receptor) que transmiten en la banda 2.4 GHz con modulación GFSK *spread spectrum*. Este tipo de enlace está variando continuamente en forma pseudo aleatoria la frecuencia, buscando aquéllas que están libres y que sólo ocupa durante una breve fracción de segundo. De este modo el sistema no produce ni sufre interferencias. La única limitación radica en que al aumentar el número de unidades disminuye la capacidad de transmisión de las mismas. Con un 70% de frecuencias libres es posible alcanzar 115.2 KBaudios. La potencia media del transmisor es de 400 mW, ajustable en función de las condiciones de cada enlace en particular. Estas unidades pueden configurarse en red con varios tipos de geometría, pudiendo actuar también como repetidoras. Existe gran variedad de antenas, direccionales y omnidireccionales en función de cada aplicación concreta y de la geometría de la red. La alimentación del sistema se realiza a 12V nominales, con un consumo máximo de 600 mA esto permite utilizar un sistema de paneles solares y baterías. La proliferación de esta tecnología como medio de comunicación entre computadoras impedirá su utilización práctica para realizar enlaces a distancias de varios kilómetros.

### Diseño del sistema de comunicaciones

El diseño del sistema de comunicaciones debe hacerse con mucho cuidado, ya que debe funcionar especialmente bien en caso de crisis. Los accesos a los datos a través de

Internet sólo pueden utilizarse en aplicaciones no críticas como es la distribución de información entre los distintos colectivos que intervienen en la vigilancia del volcán. En todos los núcleos de la red de comunicaciones debe realizarse un almacenamiento temporal de los datos, para evitar que la interrupción de un enlace suponga la pérdida irrecuperable de la información. Estos almacenamientos temporales deben tener capacidad suficiente para que puedan ser atendidos manualmente. En general es suficiente contar con capacidad para un mes de registro continuo.

En general, la elección de un tipo de transmisión va a requerir adaptar, comprimir y, en algunos casos, reducir el volumen de datos a transmitir. Esta operación es muy delicada, debiéndose conocer muy bien cuál es la información importante a transmitir, de otro modo puede ser que se transmitan datos muy importantes, a efectos de investigación, pero poco relevantes para pronosticar cuál es la evolución del volcán o de una crisis. Es importante tener también presente que en caso de crisis muchas de estas tecnologías de comunicación fallan, por ello es imprescindible contar con un sistema redundante que permita seguir recibiendo datos en el centro de control de la crisis.

Un sistema radio punto a punto entre las estaciones remotas y los nodos, combinado con un enlace entre éstos y el centro de registro, mediante vía telefónica en condiciones normales y satélite en caso de crisis, es hoy una de las mejores opciones. Las nuevas tecnologías de transmisión de datos (*spread spectrum*), además de un elevado consumo no están autorizadas en todos los países, ya que las frecuencias que utilizan están ya ocupadas por otros servicios.

El diseño de una red de comunicaciones para el seguimiento de la actividad volcánica podría hacerse siguiendo el siguiente esquema:

1. Sensores y sistema de conversión analógico digital. Interfases de comunicación RS232/RS485 y módem.
2. Enlaces cables.
3. Enlace radio VHF / UHF de poca potencia y alcance de unos pocos kilómetros. De esta forma la probabilidad de ocurrencia de interferencias es mínima. La poca potencia permite que una pequeña batería pueda mantener en funcionamiento el sistema durante un mes. Un pequeño panel solar garantiza la operación del sistema en continuo.
4. Enlace radio VHF / UHF de potencia media y alcance de pocas decenas de kilómetros.
5. Enlaces *spread spectrum* de gran capacidad, concentradores de datos y repetidores.
6. Centro de recogida de datos. En general, situado razonablemente cerca del volcán. A este punto llegan datos procedentes de varios sensores (no sólo sísmicos). Uno o dos computadoras (por tolerancia a fallos) se encargan de mantener un registro temporal y de gestionar la transmisión de la información a la Central de Control y Adquisición de Datos.
7. Enlace hasta la Central de Control y Adquisición de Datos. Dependiendo de las características del enlace será posible transmitir el conjunto de todos los datos o sólo un resumen. Aquí cabe la mayor variedad de opciones, su elección es, además de un problema técnico, una cuestión de precio y de la legislación existente en cada país.
8. Distribución de los datos. Una red local entre las distintas computadoras del sistema de vigilancia de volcanes (preferiblemente independiente de las otras redes del centro) y un acceso exterior a través de Internet.

La utilización de enlaces punto a punto en VHF, UHF y *spread spectrum* exige visión directa o la utilización de múltiples repetidores. Además, el espectro está muy saturado y generalmente hay una falta absoluta de respeto a las frecuencias asignadas. Los sistemas *spread spectrum* presentan una relativa inmunidad a este tipo de interferencias, especialmente cuando no han de repartirse el espectro disponible muchas unidades de este tipo.

Por ejemplo, para unir las redes instrumentales a los centros de registro y análisis de datos se puede elegir un sistema combinado de telemetría radio, comunicaciones telefónicas a través de la red conmutada y de transmisión de datos. Además, el sistema debe permitir integrar instrumentos de otras instituciones que lo soliciten, así como los sistemas portátiles utilizados en caso de crisis o en función de algún experimento en curso. El enlace entre los distintos instrumentos y los distintos nodos, puede hacerse por cualquiera de las técnicas habituales como VHF, UHF y, especialmente, mediante sistemas *spread spectrum* en función de las distancias y el volumen de datos a transmitir. En muchos emplazamientos, y para poder garantizar su operación en caso de crisis, puede ser necesario disminuir considerablemente la potencia del transmisor, ya que no es posible utilizar un gran conjunto de paneles solares y baterías. Para estas situaciones se dispone de pequeños transmisores digitales de pocos mW de potencia, que permiten realizar enlaces de pocos kilómetros hasta un pequeño computador conectado a un módulo *spread spectrum* situado en un emplazamiento habitado. De esta forma es posible conectar varios sensores distribuidos en la zona a un sólo módulo, facilitando la operación y reduciendo los costos de instalación y mantenimiento.

La topografía de las áreas volcánicas activas es muy compleja, dificultando la implementación de redes de comunicaciones. Las grandes alturas, los profundos barrancos y la escasez de vías de comunicación son algunos de los elementos que originan grandes dificultades y elevan costes para la instalación y el mantenimiento de las estructuras necesarias para el soporte de las comunicaciones. Además, frecuentemente los volcanes están en zonas declaradas espacio natural protegido lo que complica aún más la instalación de las redes de comunicaciones. La utilización de enlaces radio de muy baja potencia, con antenas y paneles solares de muy pequeño tamaño, hace que el impacto ambiental sea mínimo, facilitando la obtención de los permisos necesarios para su instalación en esos parajes.

### **Acceso remoto a los datos mediante INTERNET**

El seguimiento de la actividad volcánica es hoy una ciencia multidisciplinar que involucra múltiples técnicas y que requiere la participación de numerosos especialistas. Ninguna institución dispone de recursos para poder acometer por sí sola con toda la complejidad que esto requiere. Los especialistas se encuentran en varios centros de distintas instituciones, muchas veces en ciudades o países distintos y todos ellos deben poder acceder a los datos en caso necesario y en muy poco tiempo, pero además ninguno de ellos dispone de tiempo para realizar el examen rutinario de los mismos. Además, otros científicos desean realizar trabajos de investigación a partir de estos mismos datos, trabajos que en su mayoría no tienen ninguna relevancia en cuanto a la valoración de la actividad volcánica pero sí un fuerte interés académico o científico. Finalmente, en el mundo abierto actual de la información es necesario facilitar el acceso público a los aspectos más

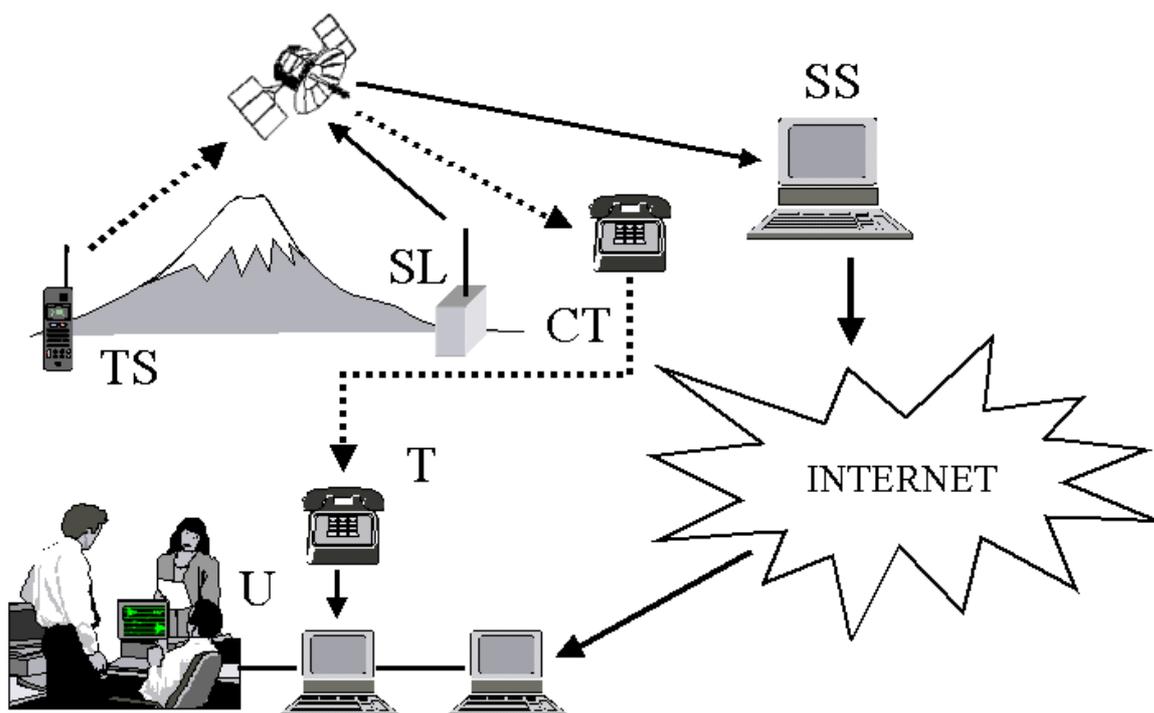
relevantes de la actividad volcánica en la zona. Es por ello que hoy, un sistema instrumental dedicado al seguimiento de la actividad volcánica debe satisfacer los siguientes puntos:

- Registro de los datos en continuo de la actividad volcánica.
- Información sobre el estado del sistema y reporte de incidencias.
- Automatización del procesado rutinario de los datos. Incluye informes y gestión de alertas.
- Mantenimiento automático de las bases de datos.
- Acceso remoto a todo el conjunto de datos por los especialistas involucrados.
- Acceso remoto a un conjunto restringido y personalizado de datos por los científicos invitados.
- Acceso a la información por el público en general.
- Contabilidad del coste real de la operación del sistema y facturación si procede.

Este concepto es muy reciente, pues no hace mucho tiempo cada especialista tenía acceso a los datos proporcionados por su propio instrumento, que en general eran sólo examinados superficialmente, salvo que se detectara alguna anomalía (en los propios datos o por noticias externas). Hoy no sólo hay que abrir el conjunto de los datos a los otros especialistas, sino también al público en general. Además, esto obliga a que el sistema siempre esté operando correctamente, pues en caso contrario todo el mundo es consciente de su no operación, con las consecuencias que esto pueda acarrear a los responsables. Finalmente, todo servicio tiene un coste, y cada vez más, se hace necesario conocerlo y en muchos casos se deberá facturar a los usuarios. Las páginas de algunos volcanes muy instrumentados que se pueden encontrar en INTERNET pueden servir de ejemplo para esta aplicación. Dado el carácter excepcional de la información de la actividad volcánica, y especialmente de su importancia en caso de crisis, se deben establecer distintos niveles de acceso a la información en función del tipo de usuario.

1. Información rutinaria: se envía periódicamente a cada usuario. Contienen una parte general, la misma para cada usuario y una específica para el responsable de cada instrumento.
  - a. Resumen: es el informe diario, generado automáticamente de la actividad registrada en todo el sistema. Se remite a todos los usuarios registrados.
  - b. Estado: es el informe diario correspondiente al estado de los distintos instrumentos. Esta información es importante para garantizar el mantenimiento del sistema, específico para cada instrumento. Se remite solamente al usuario responsable de cada sistema y al supervisor.
  - c. Datos: Es el conjunto de todos los datos registrados en cada instrumento. Se remiten sólo al computador de cada responsable donde se incorpora automáticamente a la base de datos.
2. Acceso: privilegios de acceso de cada usuario registrado
  - a. Datos: autorizado a consultar (copiar) datos de un determinado instrumento
  - b. Sistema: autorizado a modificar las condiciones de operación de cada instrumento. Limitado sólo al responsable del instrumento y parcialmente al supervisor.

Los usuarios no registrados sólo pueden consultar las páginas INTERNET de acceso público



**Figura 5-19.** Actualmente es posible utilizar enlaces satelitales para acceder a los instrumentos situados sobre el volcán. Una posibilidad es utilizar sistemas de telefonía por satélite (TS) que conectan a través de una compañía telefónica (CT) al teléfono del centro volcanológico (T). Otra posibilidad es utilizar enlaces de mensajería por satélite (SL) que se reciben via INTERNET a través de un suministrador del servicio (SS).

### Software de comunicaciones

De poco sirve contar con el sistema de comunicaciones si no se dispone del soporte informático necesario para su operación. En él podemos distinguir tres paquetes independientes, que se corresponden con la adquisición y transmisión de datos, el procesado y análisis y la difusión de la información.

1. Operación de las estaciones de campo y comunicación de éstas con las unidades de acceso a la red.
  - a. Adquisición de datos en las estaciones remotas.
  - b. Preprocesado en las estaciones de campo.
  - c. Transmisión punto a punto (estación de campo a nodo) y entrada en la red.
2. Operación rutinaria de almacenamiento de datos, supervisión del funcionamiento y elaboración automática de informes.
  - a. Bases de datos.
  - b. Gestión automática de alertas en función de la actividad detectada.
  - c. Gestión de errores en el sistema.
3. Actualización automática de la página INTERNET.
  - a. Automatización del informe periódico de la actividad registrada y su envío mediante e-mail a lista de usuarios.

- b. Servicios de usuarios. Acceso a las bases de datos, información detallada en tiempo casi real. Acceso remoto por parte de los usuarios con tres niveles.
4. Tipos de usuarios
- a. Usuarios responsables (instituciones responsables de la instrumentación)
  - b. Usuarios invitados (científicos autorizados con distinto nivel de acceso).
  - c. Usuarios no registrados : resumen de la actividad en páginas públicas.

### **Sistemas de comunicación por satélite**

El mayor problema para la instrumentación de volcanes activos es el acceso remoto a los datos, no siempre es posible utilizar sistemas de telemetría que operen en todo tiempo a precios asequibles. La transmisión de datos vía satélite es una posibilidad, pero los costes de operación de una transmisión continua son muy elevados y sólo grandes instituciones pueden asumírselos. Sin embargo, reduciendo la información a transmitir es posible conseguir precios asequibles por estación. En este sentido caben dos posibilidades:

- Transmisión de un resumen de la actividad mediante un canal unidireccional.
- Sistema interrogado mediante un canal bidireccional.

El sistema ARGOS fue el primero que se desarrolló para el seguimiento de la actividad volcánica y transmitía un resumen de la actividad mediante un enlace unidireccional, sin embargo los costes de propiedad y especialmente de operación han limitado su uso intensivo. Recientemente se ha desarrollado un sistema de mensajería bidireccional que permite recibir un resumen de los datos y, en caso necesario, solicitar el envío de información complementaria a un coste extra. También es posible utilizar telefonía por satélite que permiten 9600 baudios y con precios por minuto asequibles

### **Sistemas lentos de comunicación por satélite**

En este capítulo se presenta una aplicación de un enlace satelital de baja capacidad para el seguimiento de la actividad de volcanes situados en zonas de difícil acceso, donde los sistemas de telemetría convencional no son aplicables. Estos sistemas de comunicación se han desarrollado para transmitir mensajes breves desde una estación remota (móvil o no) a una central de datos que envía en forma de correo electrónico la información a una serie de usuarios registrados. Aplicaciones típicas son el control de flotas, seguimiento de animales, etc. La baja tasa de transmisión permite utilizar frecuencias bajas en la banda de VHF, posibilitando el desarrollo de terminales económicos, de bajo consumo y que no requieren antenas complejas. El desarrollo de la aplicación supone el acoplamiento de los sistemas existentes para el seguimiento de la actividad volcánica a la capacidad del enlace.

El seguimiento de la actividad de ciertos volcanes posee características singulares tales que la telemetría por satélite sea una solución válida.

- Carácter disperso de los centros volcánicos activos.
- Volcanes muy alejados de los centros de seguimiento.
- Muy poca actividad en las fases de reposo. Incremento rápido al iniciarse una crisis.
- Necesidad de múltiples sensores (sísmica, deformación, gases, electromagnéticos).

- Gran volumen de datos, que se deben procesarse automáticamente y extraer los niveles de actividad que son los únicos que se transmiten.
- Zonas aisladas. Necesidad de operar con muy poca energía.

Los costes de propiedad y operación se mantienen en márgenes razonables, pudiéndose estimar en menos de 50 \$ USA la transmisión de 8 KBytes al mes. El desarrollo de una aplicación para estos enlaces pasa por el diseño de un sistema de análisis automático de los datos de forma que pueda comprimirlos lo suficiente para poder transmitir la información esencial en muy pocos Bytes. También están ya disponibles sistemas de telefonía por satélite. Estos sistemas operan con velocidades de 9600 baudios, lo que permite transmitir un mayor volumen de datos. Sin embargo el coste (2 \$ USA minuto) puede resultar todavía elevado para el seguimiento de volcanes con actividad estacionaria.

### **Instrumentación que debe integrarse en el enlace satélite**

La vigilancia instrumental de un volcán o zona volcánica no puede reducirse a la detección de un sólo precursor, ya que tal información sería peligrosamente engañosa. En la actualidad, se recomienda que la vigilancia se realice analizando conjuntamente los datos proporcionados por al menos tres observaciones de carácter geofísico y geodésico, complementadas en su caso por la información que aporte el quimismo de emanaciones gaseosas de origen profundo. El sistema de vigilancia básica de volcanes se centra en registrar los siguientes parámetros:

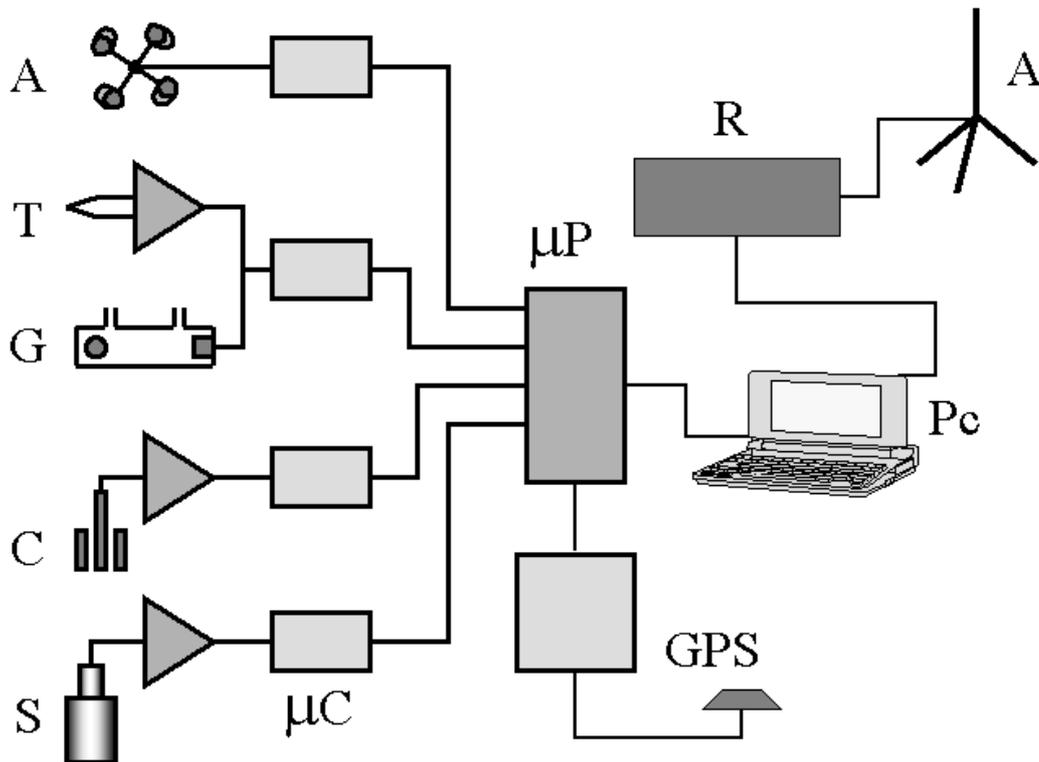
- Actividad sísmica.
- Deformación del terreno.
- Campo geomagnético y electromagnético.
- Gases y temperaturas.

Los sistemas de vigilancia deben estar situados en zonas aisladas para evitar el ruido de origen antrópico y además poder operar en caso de crisis de origen volcánico, lo que obliga a que el sistema de telemetría adoptado siga funcionando correctamente cuando la red eléctrica o telefónica fallen, al menos en la isla o región donde se desencadene la crisis. Además de las estaciones permanentes, se debe estar en condiciones de desplegar rápidamente una red complementaria de la instrumentación fija existente, cuyos datos deberán integrarse al sistema permanente.

### **Sistemas de telemetría**

Un aspecto muy importante a considerar para el seguimiento y evaluación inmediata de los fenómenos volcánicos es el relativo al sistema de comunicaciones que permita la centralización y acceso inmediato a todos los datos disponibles. Existe actualmente un amplio desarrollo en tecnologías de la comunicación, pero con un costo demasiado elevado para su aplicación en regiones de riesgo volcánico moderado o para vigilar volcanes que no están en crisis; sin embargo, un cuidadoso estudio de las diferentes opciones permite aprovechar las ventajas que ofrecen las distintas tecnologías con un costo razonable. Telefonía móvil o fija, radio enlaces VHF, UHF y especialmente *spread spectrum* o satélite son algunas de estas tecnologías, a las que se debe añadir la conexión a la red INTERNET para el acceso remoto y múltiple a los datos. Es importante tener también

presente que en caso de crisis muchas de estas tecnologías de comunicación fallan, por ello es imprescindible contar con un sistema redundante que permita seguir recibiendo datos en el centro de control de la crisis. Un sistema radio punto a punto entre las estaciones remotas y los nodos, combinado con un enlace entre éstos y el centro de registro, mediante vía telefónica en condiciones normales y satélite en caso de crisis, es hoy una de las mejores opciones. Lamentablemente, la mayor parte de los volcanes de alto riesgo están situados en zonas donde no existe comunicación telefónica (ni fija ni móvil) y con dificultades de suministro energético e incluso, de establecer enlaces radio sin una compleja red de repetidores. En estas situaciones, la única solución viable actualmente es la utilización de enlaces satélite de baja velocidad.



**Figura 5-20.** Ejemplo de estación para el seguimiento de la actividad volcánica con telemetría satelital. A anemómetro, T termómetro, G gases, C clinómetros, S sismómetro. Para facilitar la implementación del sistema cada sensor posee su sistema de microproceso independiente  $\mu C$ . La información es canalizada a través de un microprocesador de mayor capacidad a un pequeño computador que gestiona las comunicaciones.

### Aplicación al seguimiento de la vigilancia de volcanes

El desarrollo de la aplicación parte considerando la longitud típica disponible para un mensaje diario, 8 KBytes/mes corresponde a poco más de 256 Bytes/día. Es decir 10 Bytes/hora más 16 Bytes extras por día. El siguiente paso es analizar cual es la información de que disponemos. En el caso de la vigilancia de volcanes, una estación multiparamétrica típica dispone de los siguientes sensores:

- Sísmica
- Deformación
- Temperatura

- Gases
- Electromagnético

Además deberemos incluir para posibles correcciones información de los parámetros ambientales, tales como:

- Temperatura
- Velocidad del viento
- Precipitación

También deberá incluirse información sobre posibles problemas instrumentales, tales como

- Tensión alimentación
- Errores del sistema

Todos estos sensores se encuentran emplazados en las proximidades del sistema de procesado de datos y comunicaciones o pueden estar enlazados mediante sistemas de telemetría de corto alcance (cable o UHF). La estación piloto combinará ambas modalidades, pues es conveniente en muchos casos, por cuestiones de vandalismo, instalar todo el sistema de procesado y telemetría en un núcleo poblado y disponer los sensores a cierta distancia enlazados por radio de muy baja potencia.

La información más importante para el seguimiento de la actividad volcánica es la sísmica y también la que más datos genera. Por ello será la que más espacio va a ocupar en la transmisión. Una primera propuesta de reparto del espacio disponible es:

Información		Bytes por día
Sísmica	RSAM	144
	Disparos LTA/STA	24
	Máximo evento	48
Deformación	Inclinómetro de dos componentes	4
Gases	CO <sub>2</sub>	2
Temperatura	Temperatura suelo	2
Electromagnética	Dos canales	4
Ambientales	Velocidad viento máxima ráfaga	1
	Velocidad viento media	1
	Temperatura media	1
	Precipitación diaria	1
	Insolación	1
Sistema	Alimentación	1
	Errores	1
	Alarmas	1
Otros (sin asignar)		20
TOTAL		256

Salvo la sísmica, toda la información se resume como medias diarias, pues son parámetros de variación muy lenta. La información sísmica envía el número de eventos que superan el algoritmo de disparo cada hora, las características del máximo evento registrado cada hora y el RSAM, obtenido calculando la amplitud media cada diez minutos (o la máxima

amplitud cada diez minutos, según criterio del operador). En caso de que no se haya activado el algoritmo de disparo (disparos = 0) se envían las características espectrales medias del ruido sísmico por si pudiera corresponder a la presencia de un tremor volcánico. Se han separado los errores del sistema como son los fallos de alimentación, el reset del sistema, la memoria agotada, etc. de las alarmas relacionadas con la actividad del volcán tales como el desbordamiento de la amplitud de la señal sísmica, la variación excesiva en los clinómetros o una emisión anormal de CO<sub>2</sub>, etc. En caso necesario, es posible activar transmisiones extraordinarias con otros contenidos, por ejemplo enviar una traza sísmica de un evento en concreto.

Como sensor de gases sólo se considera un detector de CO<sub>2</sub> ya que la difusión de este gas es posible medirla a distancias considerables del centro activo. Los sensores para otros gases, como H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, HCl, etc. aunque ya se encuentran disponibles en el mercado, exige emplazarlos en zonas de emisión fumaroliana, lo cual no es sencillo por los problemas de corrosión que presentan. En todo caso, si es posible instalarlos se puede utilizar alguno de los Bytes que quedan disponibles. Al ser la comunicación bidireccional es posible modificar el contenido de los mensajes a fin de adecuarlo a los niveles de actividad del volcán.

Un simple microcontrolador puede preparar estos mensajes, sin embargo será necesario disponer de una cierta capacidad de almacenamiento para poder atender las peticiones extraordinarias de datos. En este sentido, es preferible diseñar la estación remota alrededor de un computador de bajo consumo para el procesado de los datos y la gestión de las comunicaciones por lo que se requieren al menos dos puertos serie.

### **Sistema con enlace telefónico**

Estos enlaces poseen mucha mayor capacidad de transmisión, pues no están condicionados por una longitud de mensaje fija, siendo su única limitación el precio a pagar por cada conexión. Una solución relativamente económica consiste en transmitir rutinariamente mensajes con la misma estructura utilizada para los enlaces de baja capacidad, reservando toda la capacidad de transmisión para los eventos extraordinarios o situaciones de crisis. De este modo el coste de operación del sistema se puede mantener dentro de límites aceptables.

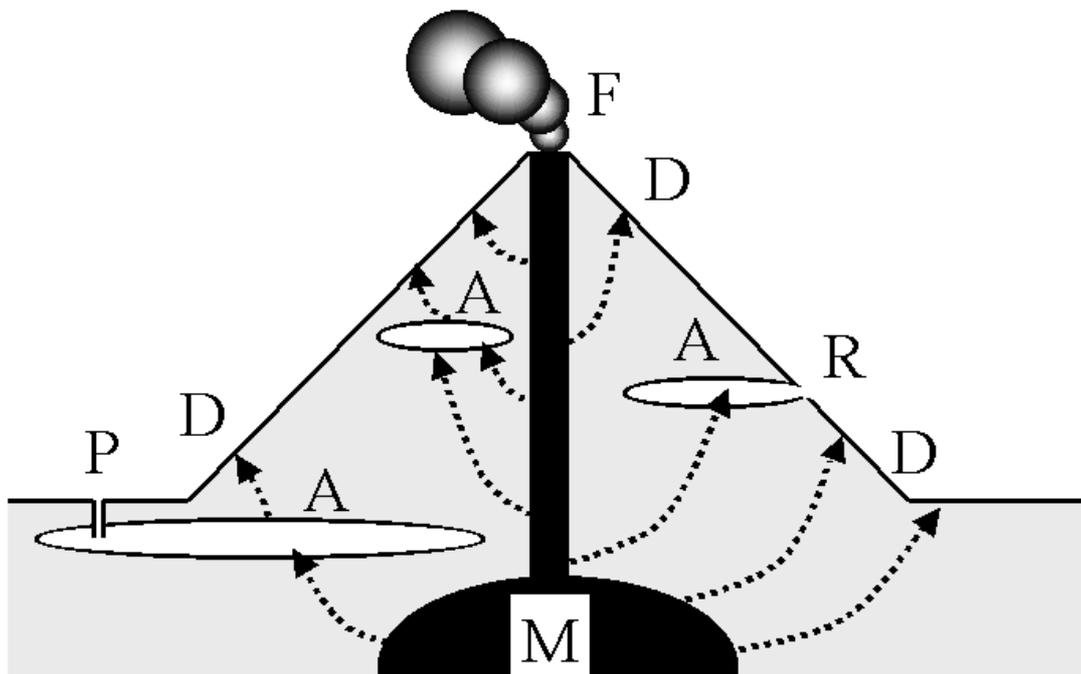
La fuerte competencia que ofrecen las redes de telefonía móvil terrestres hace suponer que los precios de utilización de los satélites seguirán bajando en los próximos años, facilitando con ello su aplicación a la vigilancia de volcanes. Con la ventaja de que en caso de crisis el enlace satelital no se interrumpe, como generalmente ocurre con los sistemas terrestres. Para estos casos es conveniente disponer también de un sistema de recepción directa desde el sistema, por ejemplo un teléfono, ya que si la recepción se realiza mediante líneas convencionales lo más fácil es que se interrumpan y tampoco tengamos acceso a los datos.

Es posible utilizar estos diseños con otros tipos de enlaces telemétricos o diseñar sistemas de adquisición de datos de muy bajo consumo que puedan operar durante todo un año. Este tipo de instrumentos pueden ser útiles para estudiar volcanes difícilmente accesibles, como es el volcanismo antártico o en la cordillera andina.

## MEDIDA DE GASES VOLCÁNICOS

### Introducción

El análisis de los gases volcánicos es una de las técnicas más utilizadas para el monitoreo de la actividad volcánica. Los gases, por su extraordinaria difusividad, traen hasta la superficie información sobre el estado del volcán. A través del análisis de sus componentes y de las posibles reacciones que entre ellos pueden tener lugar podemos conocer si el sistema está o no en equilibrio y, en tal caso, inferir cuál sería su presión y temperatura. Sin embargo, la vigilancia geoquímica de la actividad volcánica es una técnica relativamente joven, mientras que los métodos geofísicos, especialmente la sismología, hace tiempo que están universalmente aceptados, muchos factores han intervenido para que los métodos geoquímicos hayan experimentado un desarrollo más lento. En primer lugar está la dificultad de obtener muestras significativas de los gases volcánicos, pues durante muchos años sólo se disponía de datos de unos pocos volcanes. Esta falta de datos hacía imposible establecer relaciones claras entre la composición de los gases y la actividad volcánica. En segundo lugar, ningún sistema de monitoreo geoquímico puede competir con la versatilidad de un sismógrafo operando en modo continuo. Finalmente, el ambiente altamente corrosivo de las fumarolas dificulta el desarrollo de sensores que puedan operar de este modo en el área activa.

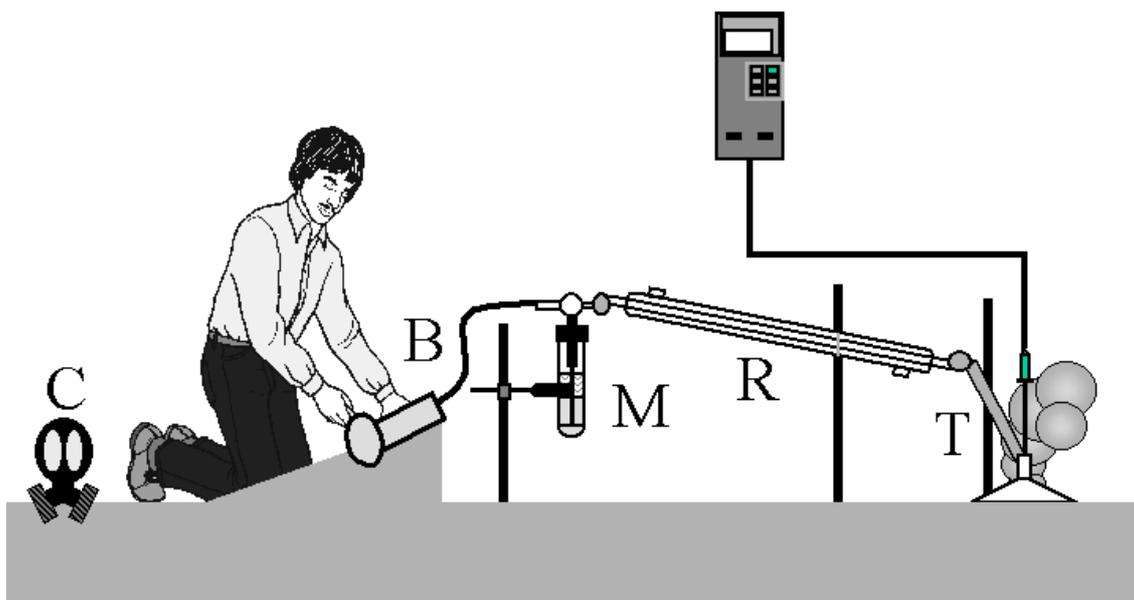


**Figura 6-1.** Los gases volcánicos que proceden de sistema magmático (M) llegan a la superficie a través del sistema de fracturas dando origen a las fumarolas (F). Otra parte, especialmente el  $\text{CO}_2$  se difunde a través del edificio volcánico (D). Los gases se disuelven en el agua de los acuíferos (A), apareciendo en las fuentes termales (R) o en los pozos (P)

A pesar que desde antiguo ha existido un interés para el estudio de la emisión gaseosa en volcanes, todavía hay que seguir con los muestreos manuales, tomando muestras que luego son analizadas en el laboratorio mediante técnicas clásicas de la química analítica.

La medición de la composición química de los gases en continuo sería de gran importancia ya que nos facilitaría un gran número de datos, lo cual revertiría en un mejor conocimiento del sistema en estudio, así como la posibilidad de identificar las variaciones de corto período. Para lograr este objetivo, se está tratando de desarrollar nuevas técnicas que permitan el control continuo de las emisiones gaseosas pero que tienen todavía una aplicación práctica bastante limitada. Un completo resumen de todas estas técnicas puede encontrarse en el monográfico *Continuous geochemical monitoring of volcanoes* publicado por la European Science Foundation, dentro del European Volcanological Project (EVOP).

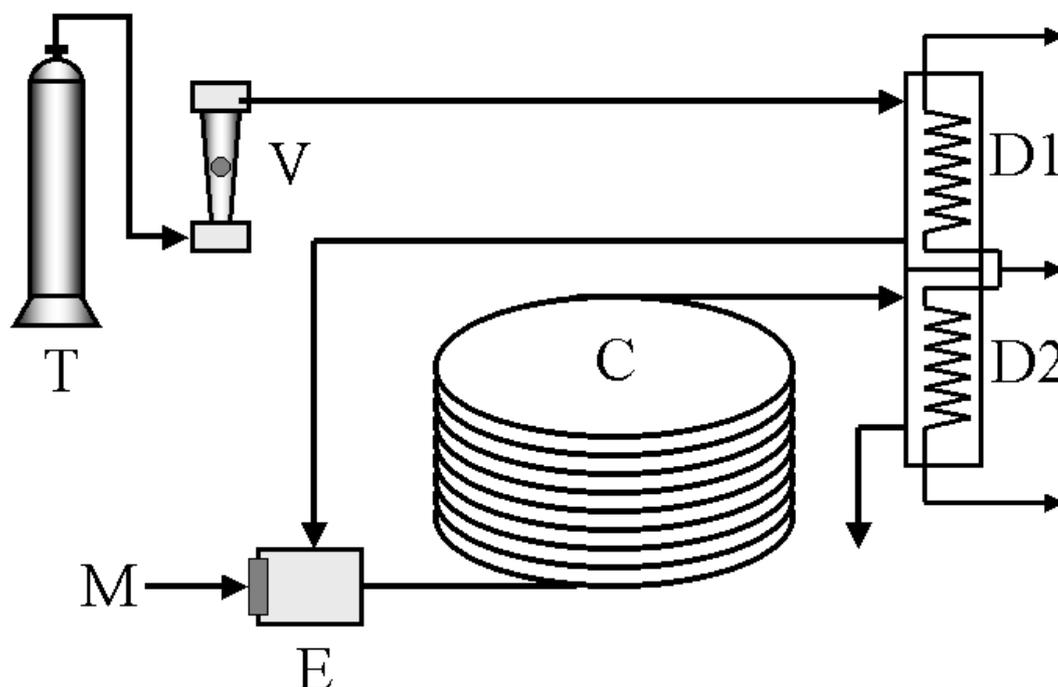
Todavía son pocos los volcanes cuya emisión fumaroliana se analiza periódicamente, aunque en estos últimos años se ha hecho un gran esfuerzo para desarrollar analizadores y sensores que faciliten esta tarea. Muchos de estos avances derivan de la investigación en el monitoreo de procesos industriales, detectores de gases para alarmas de incendios o explosiones, control de la contaminación, etc. Tradicionalmente el estudio de los gases volcánicos se ha llevado a cabo en las zonas de emisión fumaroliana próximas a los cráteres activos, hoy, el descubrimiento de la emisión difusa, es decir salida de gases a través de los flancos del volcán, ha permitido situar los instrumentos en ambientes mucho menos agresivos y disponer de sistemas de seguimiento continuo. Igualmente, las aguas que circulan por el volcán reciben inyección de fluidos magmáticos y su análisis en continuo permite conocer los cambios en la actividad del volcán.



**Figura 6-2.** La técnica más extendida para el estudio de los gases volcánicos es la recolección manual de muestras para su análisis en el laboratorio. Se introduce un tubo de muestreo T en la fumarola, a su salida se conecta un refrigerante R y después al tubo de muestreo M. Una bomba manual permite hacer circular el gas por el sistema. Es necesario medir la temperatura de emisión con un termómetro de alta temperatura. En ocasiones se requiere una máscara antigas.

El mecanismo de difusión hace posible la medida de la emisión del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y gases raros en las laderas del volcán, mientras que los gases ácidos como el  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ , en condiciones favorables pueden detectarse a distancias relativamente alejadas del cráter activo, en zonas de mucha mayor seguridad. Este tipo de emanaciones posibilitan el desarrollo de sistemas para el seguimiento continuo de la emisión gaseosa en volcanes activos.

El análisis de las aguas que circulan por el aparato volcánico permite el seguimiento de iones como  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$  y otros parámetros como el pH y la temperatura. Un sistema muy sencillo permite, en condiciones favorables, aportar un gran información sobre la actividad del volcán, sin embargo el tiempo de respuesta es mucho mayor que el correspondiente a la fase gaseosa o a los indicadores geofísicos.

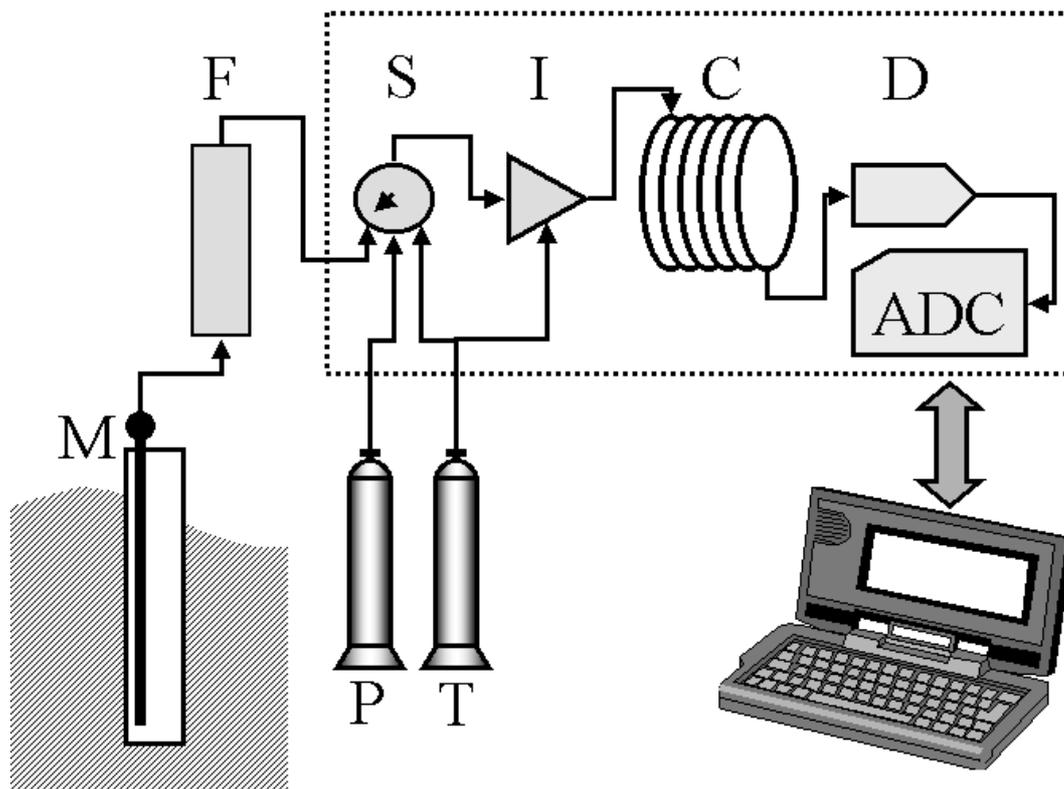


**Figura 6-3.** El cromatógrafo es el instrumento más extendido para el análisis de gases. Se basa en los diferentes tiempos que tardan los gases en recorrer un largo tubo relleno de un material poroso (columna cromatográfica C). A la salida de la columna se dispone un detector sensible a las distintas especies de gas. La muestra de gas M se introduce en el sistema mediante una válvula de entrada E, siendo arrastrado a flujo constante por un gas impulsor T. V es una válvula que permite regular la velocidad del gas. En la figura se ha representado un detector de conductividad térmica, constituido por un puente resistivo formado por dos hilos de platino (D1 y D2) situados en dos pequeñas celdas, la de medida atravesada por la mezcla de gases y la de referencia por el gas impulsor.

La fase gaseosa de un magma está constituida por combinaciones de un limitado número de elementos: H, C, O, S, Cl, F y N, asociados con metales pesados y otros elementos (metales sublimados). Las condiciones termodinámicas del sistema gas – líquido y gas – roca regulan las proporciones de las distintas especies. En un sistema a alta temperatura (superior a  $200\text{ }^\circ\text{C}$ ) están presentes  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{COS}$ ,  $\text{N}_2$ , y gases raros (He, Ar, Ne, Rn). Cuando los gases atraviesan una zona saturada en agua las especies solubles (como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ) se disuelven en el agua, enriqueciéndose las emanaciones en los gases más insolubles como  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ .

## Técnicas para el análisis de gases

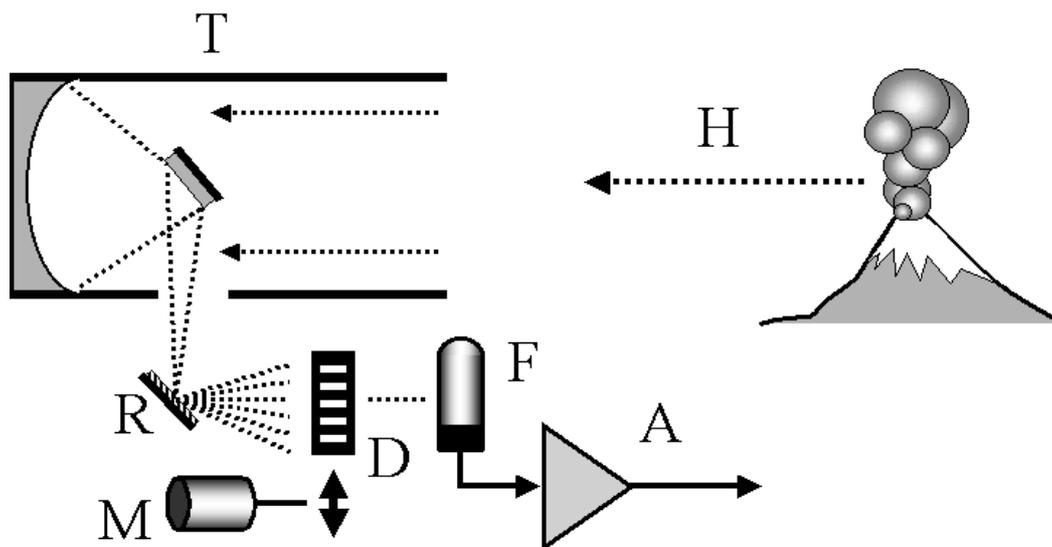
El método más sencillo para el análisis de gases volcánicos consiste en muestrear directamente las emanaciones, utilizando una botella donde se ha hecho el vacío o llena parcialmente de un reactivo para capturar determinadas especies y evitar la posterior reacción entre ellas. Posteriormente, la muestra se analiza utilizando los procedimientos clásicos de la química analítica. Durante mucho tiempo éste ha sido el único sistema para conocer la composición de los gases volcánicos.



**Figura 6-4.** La figura muestra la aplicación de un cromatógrafo para analizar en continuo las emanaciones gaseosas de un manantial M. Se utiliza un separador F para evitar que el vapor de agua en exceso penetre en el sistema de análisis. El cromatógrafo está dotado de un sistema de llaves electromagnéticas que permiten alternar la entrada del gas a medir y un gas patrón P que se utiliza para calibrar el sistema. Un computador controla todo el sistema, almacena los datos y los transmite periódicamente al observatorio.

El instrumento más extendido para análisis de gases es el cromatógrafo, cuyo fundamento es el tiempo que tardan los distintos gases en recorrer, impulsado por un gas de referencia, una columna rellena de un material poroso. A la salida de la columna se dispone un detector sensible a los distintos gases. Hay muchos tipos de detectores, siendo el de conductividad térmica el de uso más común, en combinación con una columna molecular de 5 Å y Ar u O<sub>2</sub> como gases impulsores. Muchas columnas requieren trabajar a una temperatura determinada, por lo que se requerirá en esos casos un sistema de termostatación. Actualmente se dispone de cromatógrafos portátiles que pueden operar directamente en las zonas de emisión, en forma manual o automática. Es posible construir en el laboratorio de un modo económico un instrumento de este tipo, pues todos sus elementos se venden separadamente.

El espectrógrafo de masas es otro equipo que también se está utilizando para conocer las variaciones en la composición de los gases volcánicos, siendo capaces de detectar niveles muy bajos en la concentración del gas. El principio de operación consiste en ionizar el gas, acelerándolo, haciéndolo pasar entre las piezas polares de un imán, antes de llegar al detector. La desviación es función de la masa del ión y de esta forma se conoce la especie y la concentración. En general, se trata de equipos complejos y de alto coste, que requieren una energía relativamente elevada. Cuando se desea mantener un sistema de este tipo operando en modo continuo es necesario separarlo varias decenas de metros para evitar que la corrosión debido a la presencia de los gases destruya el equipo en poco tiempo.

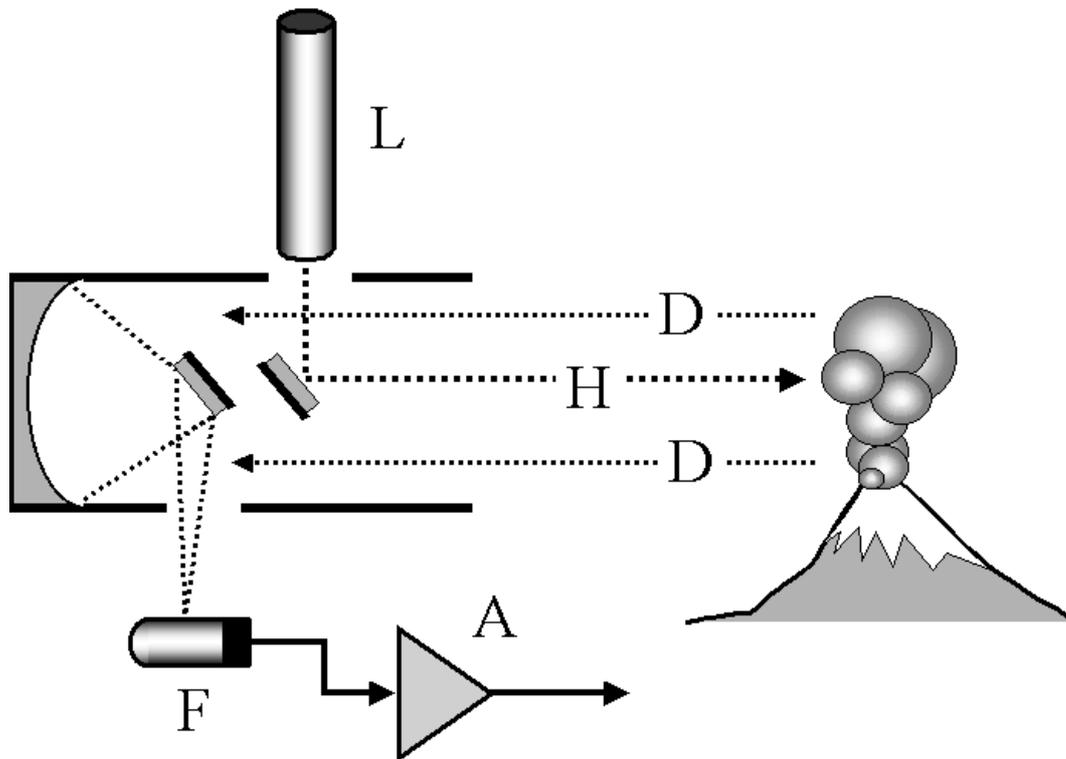


**Figura 6-5.** El COSPEC permite determinar a distancia el contenido en SO<sub>2</sub>. La luz difusa H procedente de la columna de gases se focaliza mediante un telescopio T sobre una red de difracción R. Un selector mecánico D, impulsado por un motor M, envía alternativamente las longitudes de onda correspondientes a las bandas de absorción y de referencia a un fotomultiplicador F, cuya salida A, una vez amplificada, es proporcional al contenido en SO<sub>2</sub>.

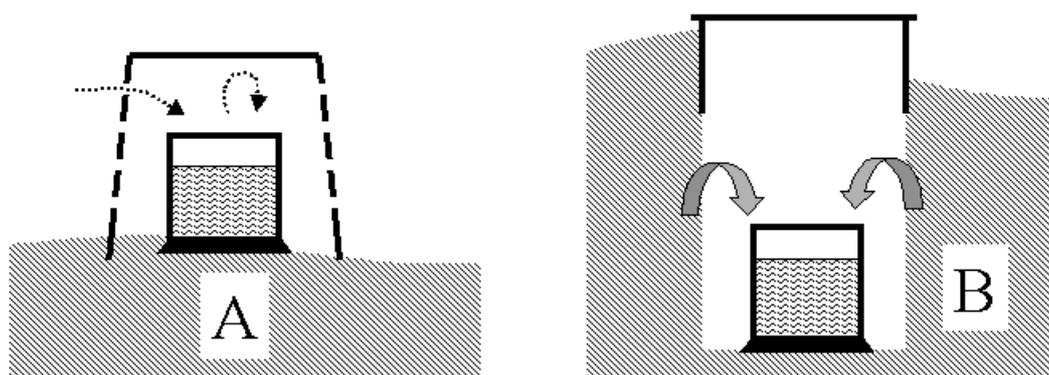
Los métodos espectrométricos consisten en analizar el espectro de emisión (o absorción) del gas e identificar así las distintas especies. Por ejemplo, la medida de la concentración de CO<sub>2</sub> se realiza fácilmente mediante la absorción en el infrarrojo (4.3 μm). Otras técnicas espectrométricas consisten en medir el desplazamiento de determinadas líneas de emisión de un elemento en presencia de otro gas. Un ejemplo es la medida de niveles muy bajos de SO<sub>2</sub> utilizando el desplazamiento de la emisión del mercurio. La absorción de determinadas longitudes de onda es también el principio de funcionamiento del COSPEC que permite conocer remotamente el contenido en SO<sub>2</sub> en una pluma volcánica. El instrumento separa el espectro ultravioleta de la luz difusa que atraviesa la pluma en dos partes, correspondientes a las líneas de absorción del gas y las longitudes de onda próximas, comparando la intensidad de ambas es posible determinar la concentración del SO<sub>2</sub>.

El LIDAR es un instrumento similar, pero que emplea un rayo láser en vez de la luz difundida por la pluma de gases. Se utiliza un láser de longitud de onda variable, realizando el análisis partiendo de la intensidad devuelta a cada longitud de onda. De

esta forma es posible determinar simultáneamente varios elementos. La potencia disponible para el láser limita el alcance útil del sistema.



**Figura 6-6.** El LIDAR es otro instrumento que se puede utilizar para el análisis a distancia de los gases volcánicos. Utiliza un láser L de longitud de onda variable, para iluminar la muestra H. La luz difundida D por la columna se focaliza mediante un telescopio sobre un fotomultiplicador F. Como estos rayos han experimentado una absorción en las bandas correspondientes, comparando las señales en distintas longitudes de onda es posible determinar el contenido en gas.

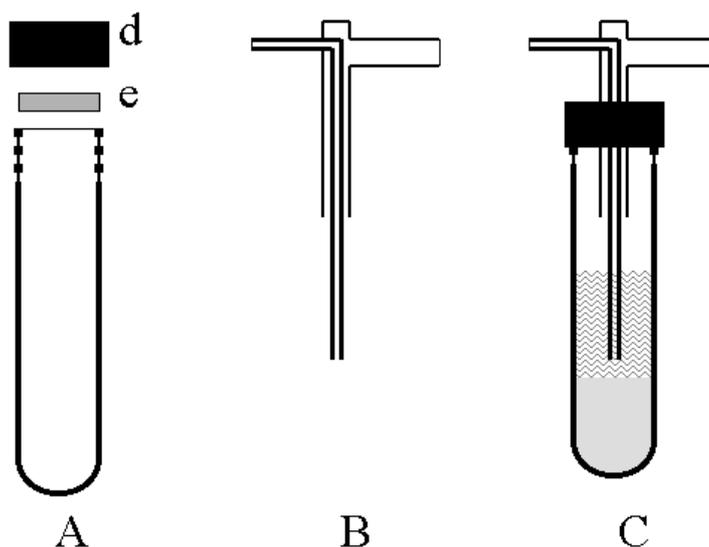


**Figura 6-7.** También existen técnicas sencillas y de bajo coste para hacer el seguimiento de las emanaciones gaseosas en los volcanes. Una de estas técnicas son las trampas alcalinas: se trata de un pequeño recipiente con una disolución alcalina (NaOH) que se deja sobre las laderas del volcán (A) para conocer los gases emitidos que son absorbidos por la disolución. Otra posibilidad consiste en enterrar la trampa, de esta forma podemos estudiar los gases que se difunden a través del suelo (B). Periódicamente se recogen las trampas y se analizan en el laboratorio.

Actualmente se encuentran disponibles sensores industriales para detectar distintos tipos de gases en concentraciones limitadas entre ciertos márgenes. Estos sensores están realizados con distintas tecnología, de estado sólido, electroquímicos, electromecánicos, etc. Se han desarrollado fundamentalmente para la realización de dispositivos de alarma ante fugas de gases explosivos o contaminantes, por lo que no siempre son aceptables para la medida cuantitativa de la concentración del gas. Además, muchos de ellos presentan interferencias con otros tipos de gases, por lo que deberá estudiarse detalladamente sus características antes de su empleo en una aplicación concreta.

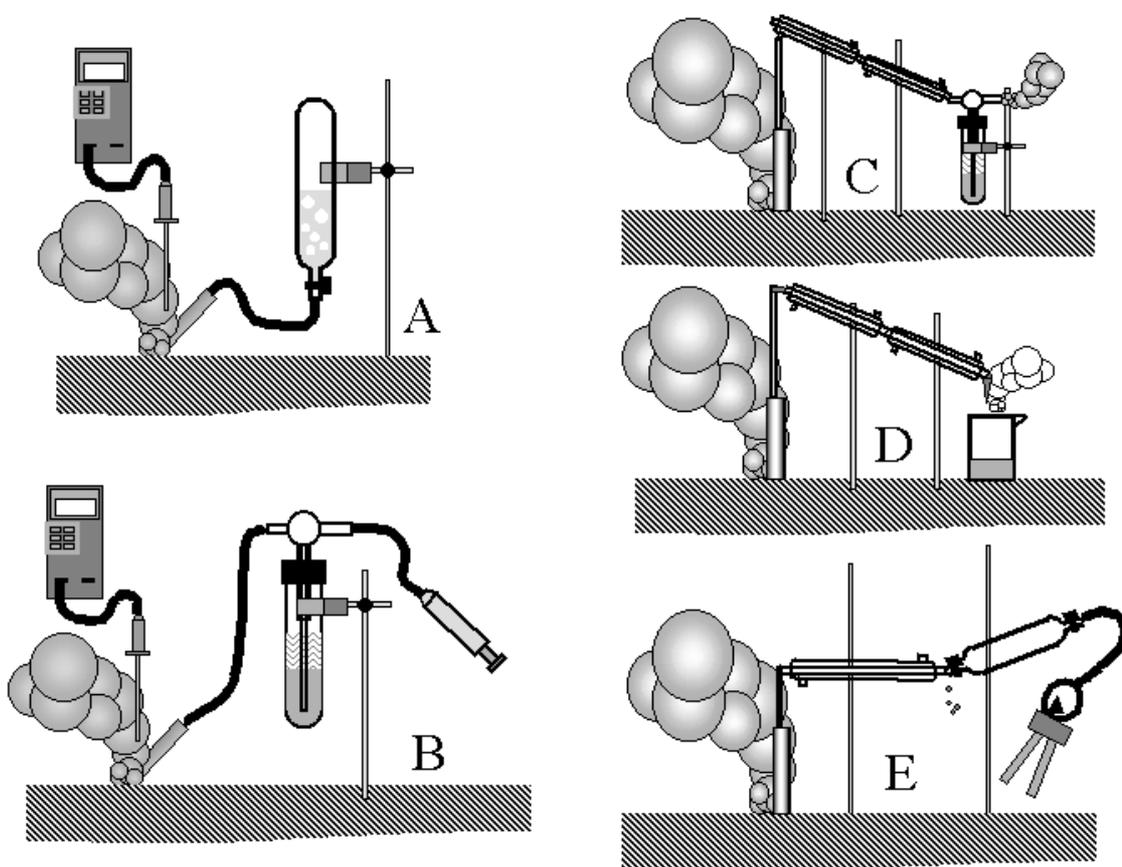
### Muestreo y análisis de gases volcánicos

El método consiste en muestrear los gases directamente en las fumarolas, eligiendo aquéllas que presenten una menor contaminación con el aire atmosférico, lo cual exige trabajar en zonas de alto peligro, pues cualquier pequeña explosión puede derivar en un accidente mortal. El muestreo debe hacerse de forma que el análisis en el laboratorio (horas, días o quizá meses después de haber sido tomada la muestra) refleje exactamente la composición de los gases en el momento del muestreo. Es necesario estabilizar la muestra y separar aquellos gases que puedan reaccionar entre sí. En general, una toma completa de muestras conlleva, al menos, cuatro técnicas diferentes, cada una para un grupo de especies gaseosas distinto. Especies como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{F}^-$ , gases ácidos, además del vapor de agua, pueden determinarse a partir de la misma muestra y por métodos químicos convencionales. Sin embargo, el  $\text{H}_2\text{S}$  y el  $\text{SO}_2$  son especies incompatibles con el tiempo ya que podrían reaccionar para formar S en forma elemental. Para evitarlo es necesaria su separación en origen, haciendo precipitar al  $\text{H}_2\text{S}$  como  $\text{CdS}$  por la presencia de hidróxido de cadmio en el medio, mientras que en la disolución quedan retenidos el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ , además del vapor de agua condensado. En todo caso, es muy importante conocer la temperatura a la que se realiza el muestreo.



**Figura 6-8** El tubo de recogida de los gases ácidos consta de: tubo (A), tiene un volumen de unos 25  $\text{cm}^3$  y se puede cerrar perfectamente con un tapón a rosca. Dentro del tubo se inserta un burbujeador (B) a través de un tapón perforado (d) y una junta tórica (e). De esta forma todo el gas que interviene circula a través de la disolución de  $\text{KOH}$  (C).

La determinación de otros elementos, como el  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , que no quedan retenidos en el  $\text{KOH}$ , se realiza mediante un segundo muestreo, esta vez en una ampolla donde se ha realizado el vacío y que contiene también una cierta cantidad de  $\text{KOH}$  para retener los componentes ya anteriormente recogidos. La componente gaseosa retenida en la ampolla se analiza mediante cromatografía de gases. Para referir los resultados del análisis de esta muestra a los obtenidos en la muestra con  $\text{KOH}$  y  $\text{Cd}$  se utiliza un elemento que pueda determinarse en ambas, como el agua. Igualmente durante la fase de muestreo es imprescindible controlar la temperatura del mismo. Las especies condensables ( $\text{Cl}$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{Br}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,...), se muestran por simple condensación de los gases emergentes con el dispositivo que más adelante se describe. Por último, un muestreo de los gases en su propio estado se lleva a cabo en una ampolla de vacío conectada a una pequeña bomba, para provocar la entrada del gas en la botellita de vidrio. Es siempre importante controlar el volumen total de agua condensada para poder referirlos al análisis total de la emisión, así como la temperatura.



**Figura 6-9** Diversos dispositivos para el muestreo de gases volcánicos. B) gases ácidos; A) otros gases; C) dispositivo para altas temperaturas; D) condensables; E) otros.

## **Análisis de gases. Dispositivos de muestreo**

### Gases ácidos

Los gases ácidos se recogen haciéndolos burbujear a través de una disolución de  $\text{KOH}$  al 25% con  $\text{Cd}(\text{ClO}_4)_2$  0.5 M.

En una fumarola de baja temperatura y cuya actividad permita trabajar en las inmediaciones del punto de emisión, el tubo de recogida se coloca mediante un soporte a pocos cm del centro de emisión, conectado al flujo de gas mediante un tubo de vidrio, que mantiene la temperatura del gas, y un tubo de teflón. Una jeringa, conectada al tubo de muestreo mediante otro tubo de teflón, permite provocar una pequeña depresión e iniciar el flujo de gas a través de la disolución. La propia reacción provoca generalmente que el flujo no se interrumpa. La temperatura se mide mediante un termopar. Aunque siempre es conveniente utilizar un tubo de titanio para canalizar el flujo de los gases y tomarlos en profundidad, en aquellos medios muy porosos es, en ocasiones, suficiente utilizar un embudo de plástico bien encajado en el salidero del gas con el tubo de teflón conectado directamente a la boca de dicho embudo.

### Gases no condensables

La recogida de los gases que no quedan retenidos en la disolución de KOH se realiza en un tubo B (conocido como botella de Giggenbach) en el que se ha hecho el vacío y que también contiene un volumen de NaOH 4M, para retener las especies ácidas. Este tubo de muestreo se coloca invertido mediante un soporte. Un tubo de titanio se introduce en el salidero de gas y se une con el tubo de muestreo mediante un tubo de vidrio. Un tubo en "t" se utiliza para unir el refrigerante con la botellita de muestreo. Se abre la llave y se deja burbujear el gas lentamente a través del NaOH. La temperatura se mide mediante un termopar.

En fumarolas de alta temperatura o cuando el dispositivo no se puede colocar en las inmediaciones del salidero de gas, se debe utilizar un sistema de tubos aislados térmicamente (vaso Dewar) para evitar que el gas se enfríe antes de llegar al tubo de muestreo. Las uniones entre tubos se realizan mediante rótulas esmeriladas unidas con pinzas. En general es necesario disponer de soportes intermedios para sujetar todo el dispositivo. En el salidero de gas se utiliza un tubo de titanio al cual se une el resto del conjunto de muestreo.

### Especies condensables

El muestreo de estas especies es el más simple de todos ya que consiste en una simple condensación de los gases emergentes. Para ello, los tubos Dewar son revestidos de un material absorbente (gasa, papel poroso) que es continuamente humedecido con agua, creando así la suficiente diferencia de temperatura para provocar la condensación. En el extremo se coloca una botellita de plástico con tapón a rosca como colector.

### Resto de especies gaseosas

Por último, se realiza un muestreo de todas las especies presentes en su estado natural para ser analizadas por cromatografía, mediante un tubo de vacío con dos aberturas y sendas llaves, conectándose al tubo de gas y a una pequeña bomba de vacío que crea la suficiente depresión. Es muy importante dejar estabilizar al sistema antes de comenzar a tomar la muestra, es decir, permitirle que alcance la misma temperatura en todo punto, además de comprobar el flujo a la salida.

## **Análisis de gases ácidos. Proceso**

Una vez recogida la muestra según la técnica indicada, el análisis puede llevarse a cabo en unas pocas horas con un equipo de laboratorio relativamente sencillo. Para el análisis se emplean métodos volumétricos y potenciométricos. Es conveniente que el tubo colector de gases sea de un tamaño reducido con el fin de poder centrifugar directamente la muestra y evitar pérdidas en la transferencia de envases. De no ser así es necesario transferir la muestra a los tubos de centrifugadora, tratando de minimizar pérdidas, haciendo lavados sucesivos que se incorporan a la muestra.

- Todo el material del laboratorio debe ser lavado con agua libre de dióxido de carbono.
- Es necesario pesar los tubos de recolección de gases, tanto antes como después del muestreo, con el fin de conocer el peso exacto del condensado recogido.

### Preparación de la muestra

Cada una de las muestras, previa homogeneización manual, es centrifugada (2 ó 3 minutos) para lograr separar el precipitado del sobrenadante. Se reparte la muestra en los tubos (limpios y secos) de la centrifugadora. Es importante lavar, minuciosamente, con agua libre de CO<sub>2</sub> el recipiente de muestreo para no perder muestra. Seguidamente se reparte equitativamente en los tubos toda la disolución para un mejor funcionamiento de la centrifugadora.

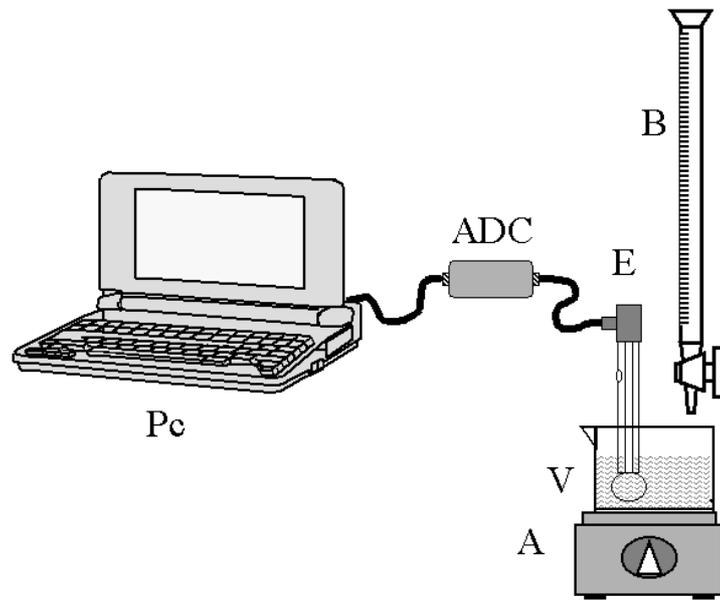
- Separación del sobrenadante. Una vez centrifugado se observará que el precipitado está pegado en el fondo; de no ser así, se centrifugará un tiempo más. Se vierten todos los sobrenadantes en un matraz aforado de 50 ml. Se lavan los precipitados con un poco de H<sub>2</sub>O (libre de CO<sub>2</sub>) se agita manualmente, se centrifuga y se añaden al matraz. Finalizada esta operación, se afora hasta los 50 ml. De esta manera tenemos controlado el volumen total de muestra.
- Separación del precipitado. Se añaden 20ml de disolución de I<sub>2</sub> a 20ml de disolución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1M aproximadamente. Esta mezcla se utiliza para redissolver el precipitado (CdS). En ocasiones la centrifugación hace que éste se compacte y sea difícil de disolver; puede ayudarse con varilla de vidrio con cuidado de no perder la muestra adherida a ella. Esta operación se repite para lograr recuperar toda la muestra y luego se lava con agua libre de CO<sub>2</sub>. Las aguas de lavado de los tubos también se añaden a la muestra. Todo ello se enrasa a 50ml (o 100ml) en matraz aforado. El hacer esto tiene el fin de saber exactamente el volumen de muestra que se tiene.

## **Determinaciones analíticas**

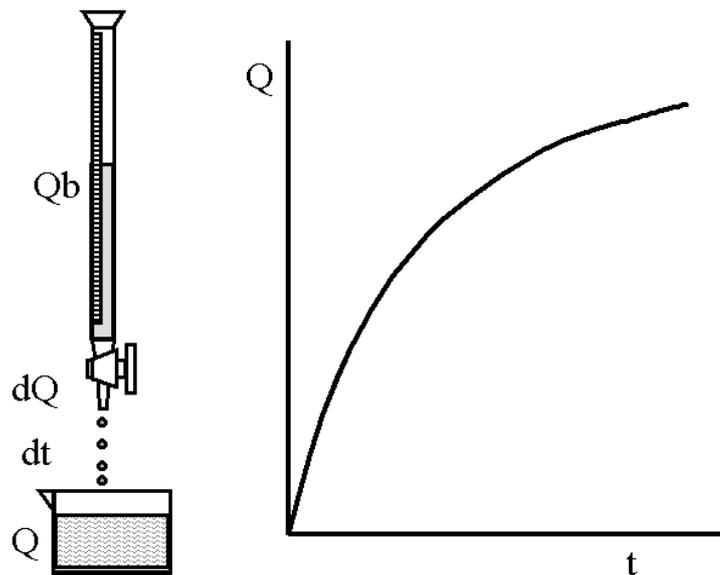
### Dispositivo instrumental

Se utiliza un sistema tradicional formado por un electrodo, un vaso con agitador magnético y una bureta. El electrodo se conecta a un conversor analógico digital (ADC) controlado por un ordenador compatible Pc a través del port serie RS232. Debe prestarse atención al problema de las fugas de corriente, pues la impedancia de entrada del electrodo es muy grande y fácilmente capta ruido procedente de las distintas fuentes

de alimentación o del propio motor del agitador. Una adecuada toma de masa y extremar la limpieza es la mejor solución. El método operacional consiste en conectar el agitador, y arrancar el programa de determinación, pulsando la barra espaciadora en el momento de abrir la llave de la bureta, (esta llave NO debe modificarse en todo el proceso), cada vez que el nivel de la bureta pase por un número determinado de aforos debe pulsarse la barra espaciadora para poder calibrar el flujo. Al finalizar la valoración el programa transforma la curva pH-tiempo en pH-volumen y calcula  $dpH/dV$ , determinando la posición de los picos correspondientes.



**Figura 6-10** Dispositivo para la determinación analítica del contenido en  $CO_2$  y  $SO_2$  en la muestra. E) electrodo de pH; V vaso con la muestra (diluida) ; B) bureta con HCl para neutralizar la muestra. ADC conversor analógico digital para la interfase del electrodo al Pc. PC computador.



**Figura 6-11.** Modelo de descarga de bureta que parte de la hipótesis de que la velocidad de descarga es proporcional a la presión.

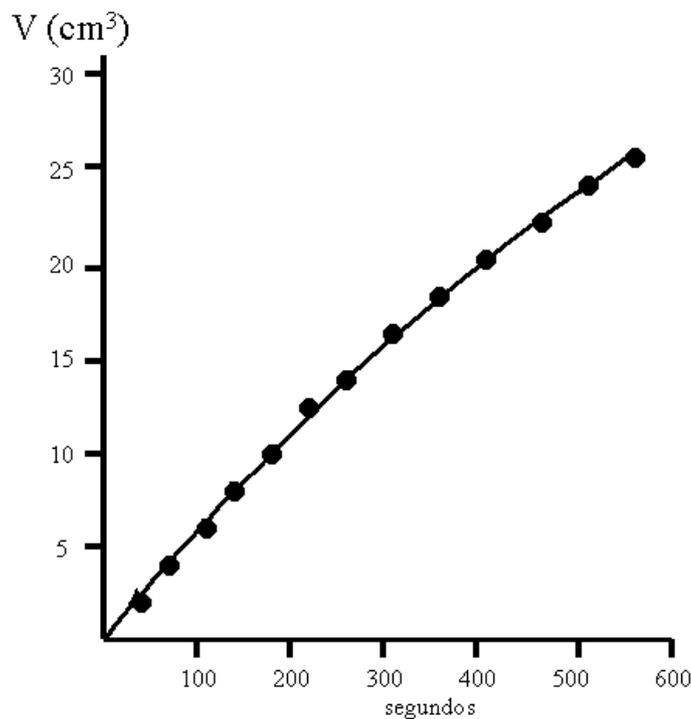
El cálculo del volumen aportado por la bureta a la muestra se determina partiendo de un modelo de descarga, en el que se admite que la velocidad de descarga es proporcional al volumen disponible en la bureta

$$\frac{dQ}{dt} = -\alpha Q$$

Cuya integración es inmediata, obteniendo para el volumen de valorante añadido a la muestra

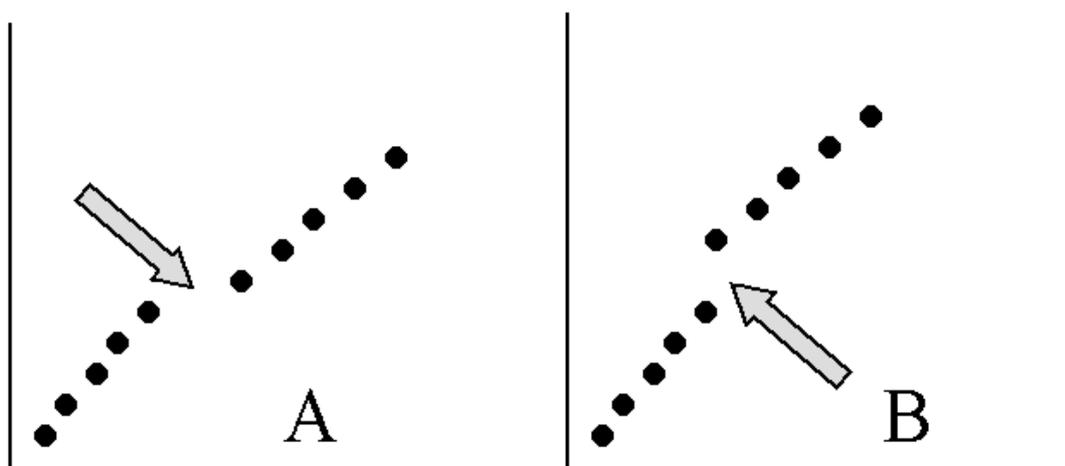
$$Q(t) = Q_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

donde  $Q$  es el volumen de valorante aportado a la muestra,  $t$  es el tiempo y  $Q_0$  y  $\tau$  son dos constantes de integración que se determinan a partir de los puntos de paso por los sucesivos aforos. El programa de adquisición toma una muestra cada segundo, marcando con un carácter especial (\*) la que corresponde a una pulsación de la barra espaciadora. De esta forma es posible representar aforos y pH en función del tiempo. Mediante el modelo de descarga se transforman inmediatamente los datos obtenidos  $\text{pH}(\text{tiempo})$  en  $\text{pH}(\text{Volumen})$  necesarios para realizar la valoración.

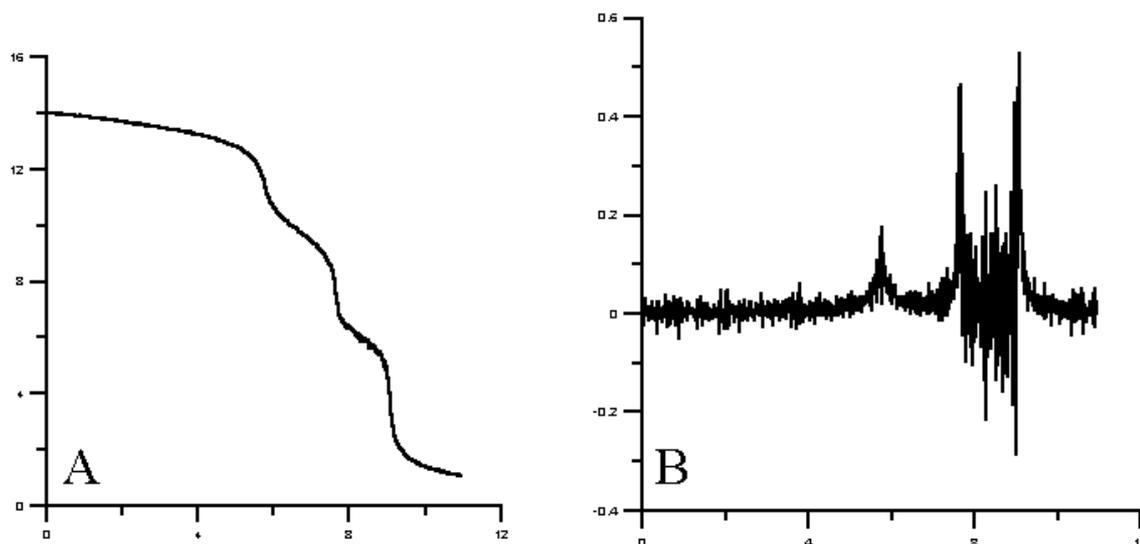


**Figura 6-12** Ajuste del modelo de descarga para un análisis real donde se muestran los puntos experimentales de aforo y el resultado del ajuste.

Como es posible que al marcar los aforos sucesivos pulsando el espaciador se introduzca algún punto falso (o se salte un aforo) el programa de ajuste comprueba la bondad de los puntos disponibles. El programa de adquisición de datos también permite añadir o suprimir algún aforo o cambiar el ajuste exponencial por una interpolación lineal entre cada dos puntos sucesivos, que permite recuperar análisis cuando la bureta sufre algún atasco. Para evitar que un error del operador provoque el bloqueo del ordenador, el programa salva directamente en disco los datos originales correspondientes al análisis, de esta forma es posible recuperarlos en caso de tener que reinicializar el sistema. Cuando se ha obtenido un buen ajuste para la función descarga de la bureta con el tiempo, es posible transformar los tiempos en volúmenes, obteniéndose las curvas de variación del pH con el volumen de valorante añadido.



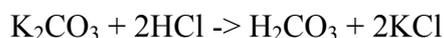
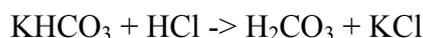
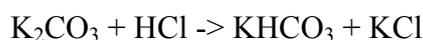
**Figura 6-13.** Es muy fácil que al marcar los aforos se pulse por error dos veces la barra espaciadora o bien que se olvide de marcar un aforo. Estos errores son subsanables ya que al representar la función aforo – tiempo, se identifican inmediatamente. En A se observa la falta de un aforo y en B hay una entrada repetida.



**Figura 6-14.** A) valores de pH de la muestra en función del volumen de HCl añadido. B) variación del pH de la muestra en función del volumen de HCl añadido. Obsérvese los picos correspondientes al paso por los puntos de equivalencia.

## Determinación de CO<sub>2</sub>

Se usa un electrodo de pH adaptado directamente a un conversor analógico digital controlado directamente por el sistema de PC, obteniéndose así la curva de calibración al mismo tiempo que se lleva a cabo la volumetría. Mediante este programa se simplifican enormemente los cálculos y los volúmenes de los distintos puntos de equivalencia son obtenidos directamente. El programa también incluye las funciones de calibración del dispositivo de electrodos. Para una mezcla de sulfitos, carbonatos e hidróxidos los tres puntos de equivalencia que se observan en la valoración con HCl son a pH 10.7, 8.0 y 4.0. Al haber exceso de KOH, los primero ml de HCl se gastarán en neutralizarlo; es el volumen consumido hasta el primer punto (10.7). Desde este punto el resto se gasta en el CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> hasta el siguiente punto. Básicamente, la determinación del CO<sub>2</sub> se basa en una acidimetría, con HCl 0.5N, que se verifica en dos etapas



En la primera etapa el carbonato se transforma en bicarbonato, y el pH se hace 8.31. Para ello se gasta sólo la mitad de todo el volumen de ácido necesario para la total neutralización de K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Por lo tanto el volumen gastado en valorar el CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, o lo que es lo mismo el CO<sub>2</sub>, se puede sacar multiplicando por dos el volumen gastado de disolución hasta llegar al segundo salto, ya que el primero es para el KOH en exceso. Se obtendrán, con el ordenador, tres volúmenes correspondientes a los tres puntos de inflexión.

PH	Vol. (ml)	ΔVol. (ml)
10.7	V <sub>0</sub>	
8.0	V <sub>1</sub>	ΔV <sub>1</sub> = V <sub>1</sub> - V <sub>0</sub>
4.0	V <sub>2</sub>	ΔV <sub>2</sub> = V <sub>2</sub> - V <sub>1</sub>

El primer ΔV<sub>1</sub> es el volumen gastado en el primer paso de carbonato a bicarbonato. Por tanto, sabiendo la condición en el punto de equivalencia

$$n1 \text{ meq HCl} = n1 \text{ meq CO}_3^{2-} (\text{CO}_2)$$

y que

$$n1 \text{ meq} = V * N$$

donde V es el volumen y N la concentración en meq/ml (normalidad). El volumen gastado en el CO<sub>2</sub>

$$V_{\text{HCl}} = \Delta V_1 * 2 \text{ (ml)}$$

entonces

$$n1 \text{ meq CO}_2 = V_{\text{HCl}} * 0.5$$

Es fácil obtener la concentración de CO<sub>2</sub>

$$N_{CO_2} = V_{HCl} * 0.5 / V_{aliquota} \text{ (meq/ml)}$$

En los 50 ml que tenemos

$$n1 \text{ meq } CO_2 \text{ totales} = V_{HCl} * 0.5 * 50 / V_{aliquota}$$

El porcentaje en peso de  $CO_2$  en la muestra

$$\%CO_2 = (n1 \text{ meq } CO_2 \text{ TOTALES} * P_m / 1000 * v * g. \text{ muestra}) * 100$$

donde  $P_m$  es el peso molecular y  $v$  la valencia. Sustituyendo

$$\%CO_2 = (n1 \text{ meq } CO_2 \text{ TOTALES} * 44.0098 / 1000 * 2 * g. \text{ muestra}) * 100$$

### Reactivos

- HCl : 0.5N ( comercial ).
- Todas las disoluciones han de prepararse con  $H_2O$  libre de  $CO_2$ .

### Dispositivo experimental

- Electrodo pH
- PC portátil
- Adaptador PC - electrodo.
- Agitador magnético.
- Bureta 50cc, enrasada siempre a 0ml.

### Proceso

Una alícuota de 10 ml se sitúa en un vaso de precipitados de 50cc. Se ubica el vaso sobre el agitador magnético y se introduce el electrodo (previamente calibrado) en el seno de la disolución permitiendo la agitación continua. Es importante evitar cualquier contaminación exterior de  $CO_2$  por lo que no es conveniente tener fuentes tales como estufas, dilución en el análisis, etc. Se coloca por medio de un soporte la bureta con HCl (0,5 N) enrasada a cero. Con el agitador encendido se abre la llave de la bureta y al caer la primera gota se activa el programa del ordenador presionando la barra espaciadora. El goteo debe ser constante y regular y cada 2cc se le debe indicar al ordenador, presionando una tecla. La gráfica en pantalla del PC nos da la pauta de cuando está terminada la valoración. Con el dato del volumen consumido en el paso de carbonato a bicarbonato ( $\Delta V_1$ ) y realizando las operaciones indicadas anteriormente, se calcula el porcentaje de  $CO_2$ . Es conveniente realizar cada determinación al menos tres veces con el fin de asegurarse de no estar cometiendo algún error. De estos tres análisis se obtendrá el valor medio.

### Determinación de $SO_2$

Una primera aproximación de la cantidad de  $SO_2$  en la muestra puede sacarse de la diferencia entre el  $\Delta V_1$  y el  $\Delta V_2$ , de la determinación anterior. Teóricamente el  $\Delta V_2$  habría de ser mayor que el  $\Delta V_1$ , lo cual nos indicaría que en la 30 etapa se consumió HCl para  $HCO_3^-$  y para el sulfito. Sin embargo, se ha comprobado que si hay poca cantidad de  $SO_2$  este método es demasiado erróneo, obteniéndose resultados muy

variables. Por ello se adopta otro método más específico. Se trata de oxidar todo el azufre existente en la disolución (SO<sub>2</sub>) a sulfato y posteriormente llevar a cabo una valoración potenciométrica con formación de complejo soluble, con perclorato de Pb. Se usa un electrodo ionoselectivo para detectar el punto final de la valoración. Llegados a este punto, la concentración del ión sulfato se obtiene de

$$N_{\text{SO}_4^-} = N_{\text{Pb}^{2+}} \cdot V_{\text{Pb}^{2+}} / V_{\text{SO}_4^-} \text{ (meq/ml)}$$

Los meq los obtenemos teniendo en cuenta los ml de alícuota. El porcentaje en peso de SO<sub>2</sub> en la muestra

$$\% \text{SO}_2 = (n1 \text{ meq SO}_{2\text{TOTALES}} * Pm/1000 * v * g.\text{muestra}) * 100$$

sustituyendo

$$\% \text{SO}_2 = (n1 \text{ meq SO}_{2\text{TOTALES}} * 66/1000 * g.\text{muestra}) * 100$$

### Reactivos

- H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30% (comercial)
- H<sub>2</sub>O libre de CO<sub>2</sub>
- HClO<sub>4</sub> diluido
- Metanol
- Pb<sub>2</sub>ClO<sub>4</sub> 0.01M

### Dispositivo experimental

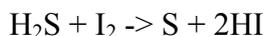
- Electrodo específico
- Electrodo de referencia
- Computador
- Adaptador PC - electrodo.
- Agitador magnético.
- Bureta 25 cc, enrasada siempre a 0ml.

### Proceso

A una alícuota de la muestra líquida se le añaden varias gotas de peróxido de hidrógeno al 30% y se lleva a sequedad. Se añaden 5 ml de H<sub>2</sub>O y se lleva a pH 5 mediante adición de HClO<sub>4</sub> diluido. Una vez obtenido esto, el volumen debe ser doblado con una solución de metanol, con el fin de evitar procesos de oxidación posteriores. Llegados aquí se tiene la muestra preparada para la titulación con perclorato de Pb 0.01 M, procediendo de igual manera que se ha descrito antes para el CO<sub>2</sub>.

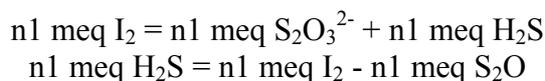
### Determinación de H<sub>2</sub>S

El H<sub>2</sub>S fue separado del resto en el muestreo al hacerlo reaccionar con el Cd(ClO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> y precipitar como CdS. Se determinará por tanto de la fase sólida. Básicamente se trata de una iodometría, por la que el S<sup>2-</sup> se oxida por el iodo de acuerdo con la ecuación



en medio ácido (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Con el fin de obtener resultados más seguros, el reductor que se determina se trata con una cantidad excesiva y conocida de disolución de iodo y a

continuación el exceso del yodo se valora con tiosulfato (valoración inversa o por retroceso). En el punto de equivalencia se cumple



como  $n1 \text{ meq} = V * N$

$$n1 \text{ meq } H_2S = V(I_2) * N(I_2) - N(S_2O_3^{2-}) * V(S_2O_3^{2-})$$

En la muestra de 50ml

$$n1 \text{ meq } H_2S_{\text{TOTALES}} = (V(I_2) * N(I_2) - N(S_2O_3^{2-}) * V(S_2O_3^{2-})) * 50 / V_{\text{aliquota}}$$

$$\%H_2S = n1 \text{ meq } H_2S_{\text{totales}} * Pm(H_2S) * 100 / 1000 * v * g.\text{muestra}$$

Sustituyendo

$$\%H_2S = n1 \text{ meq } H_2S_{\text{TOTALES}} * 34.076 * 100 / 1000 * 2 * g.\text{muestra}$$

### Reactivos

- Disolución de  $I_2$  0.01 N (importante preservarla de la luz)
- Disolución de  $Na_2S_2O_3$  0.01 N (la estabilidad de esta disolución es pequeña y conviene prepararla fresca del día).
- $H_2SO_4$  1 M (ya que la oxidación del sulfuro se da en medio ácido)

### Dispositivo experimental

- Electrodo específico.
- Electrodo de referencia
- Computador.
- Adaptador PC - electrodo.
- Agitador magnético.
- Bureta 25 cc, enrasada siempre a 0ml.

### Proceso

El precipitado de CdS se redisuelve en una mezcla de  $I_2$  0.01N y  $H_2SO_4$  1M, ayudándose si es preciso de una varilla de vidrio, y se toman alícuotas de 10-20 ml. El exceso de  $I_2$  se valora con  $Na_2S_2O_3$  0.01N, utilizándose un electrodo de Pt inerte combinado para la detección del punto final. Al igual que las otras determinaciones, conviene repetirla al menos tres veces y obtener un valor medio.

### Determinación de $Cl^-$

La determinación del cloro presente en la disolución es muy sencilla mediante una valoración potenciométrica de precipitación con  $AgNO_3$  0.01 N. Para una reacción de este tipo se utilizan a menudo electrodos indicadores del propio metal del que procede el catión ( $Ag^+$ ). Sin embargo en este caso es más conveniente el uso de un electrodo de sulfuro como indicador. En el punto de equivalencia 0

$$n1 \text{ meq Cl}^- = n1 \text{ meq Ag}^+$$

$$N(\text{Cl}^-) = V(\text{Ag}) * N(\text{Ag}) / V(\text{Cl}) = 0.01 * V(\text{Ag}) / V_{\text{alícuota}}$$

La concentración de los iones  $\text{Cl}^-$  se obtendrá, siguiendo los pasos anteriores, de la expresión

$$\% \text{Cl}^- = n1 \text{ meq Cl}^-_{\text{TOTALES}} * Pm(\text{HCl}) * 100 / 1000 * \text{g.muestra}$$

#### Reactivos

- Disolución de  $\text{AgNO}_3$  0.01 N (importante preservarla de la luz)
- Disolución de  $\text{HClO}_4$  diluido

#### Dispositivo experimental

- Electrodo indicador de sulfuro
- Electrodo de referencia (calomelanos saturado)
- Computador
- Adaptador PC - electrodo
- Agitador magnético
- Bureta de 10-25 cc, enrasada siempre a 0ml

#### Proceso

Se toma una alícuota de la muestra (pueden ser unos 10 ml) y se ponen en un vaso de precipitados. La reacción de formación del complejo requiere un pH moderadamente ácido (pH 5), que se consigue por la lenta adición de  $\text{HClO}_4$  diluido. Cuando se haya conseguido, se procede a la valoración con  $\text{AgNO}_3$  0.01 N, del que presumiblemente no se necesitará mucha cantidad para llegar al punto de equivalencia. El potencial es medido de forma continua mediante un electrodo indicador de sulfuro y el de referencia.

#### Determinación de $\text{F}^-$

La determinación del  $\text{F}^-$  se realiza mediante análisis potenciométrico directo, utilizando un electrodo ionoselectivo de estado sólido de  $\text{F}^-$ . Es la única de las determinaciones que no consiste en una titulación. Las medidas son directas sobre la solución problema, obteniéndose datos de diferencia de potencial E, que son fácilmente convertibles a concentración utilizando la ecuación de Nernst apropiada. La lectura se ha de realizar a pH ácido (pH 4.7), para lo cual se utiliza el tampón acético 4M.

#### Reactivos

- Solución de ácido acético 4 M
- $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$
- NaF 0.01 M

#### Dispositivo experimental

- Electrodo indicador de Fluoruro
- Electrodo de referencia
- PC portátil.
- Adaptador PC - electrodo.
- Agitador magnético.

## Proceso

Se cogen 5 ml de tampón acético y 5 ml de muestra y se aforan a 25 ml con agua destilada. La medida se realiza con un potenciómetro digital al que se conectan los dos electrodos mencionados anteriormente. La primera lectura se realiza sobre la muestra (muestra + tampón), una vez estabilizada. La segunda lectura se hace después de haber añadido una cantidad conocida de una solución estándar de NaF 0.01 M. A partir de cada una de las lecturas se establece la ecuación de Nernst correspondiente:

$$E_1 - E_0 = -\frac{RT}{nF} \cdot \log a_{F^-}$$

$$E_2 - E_0 = -\frac{RT}{nF} \cdot \log \left( a_{F^-} + [Na F]_{añadido} \right)$$

Restando ambas expresiones se obtiene fácilmente la actividad del  $F^-$ , expresable en otras unidades.

$$\frac{E_1 - E_2}{\frac{RT}{nF}} = \log \frac{\left( a_{F^-} + [Na F]_{añadido} \right)}{a_{F^-}}$$

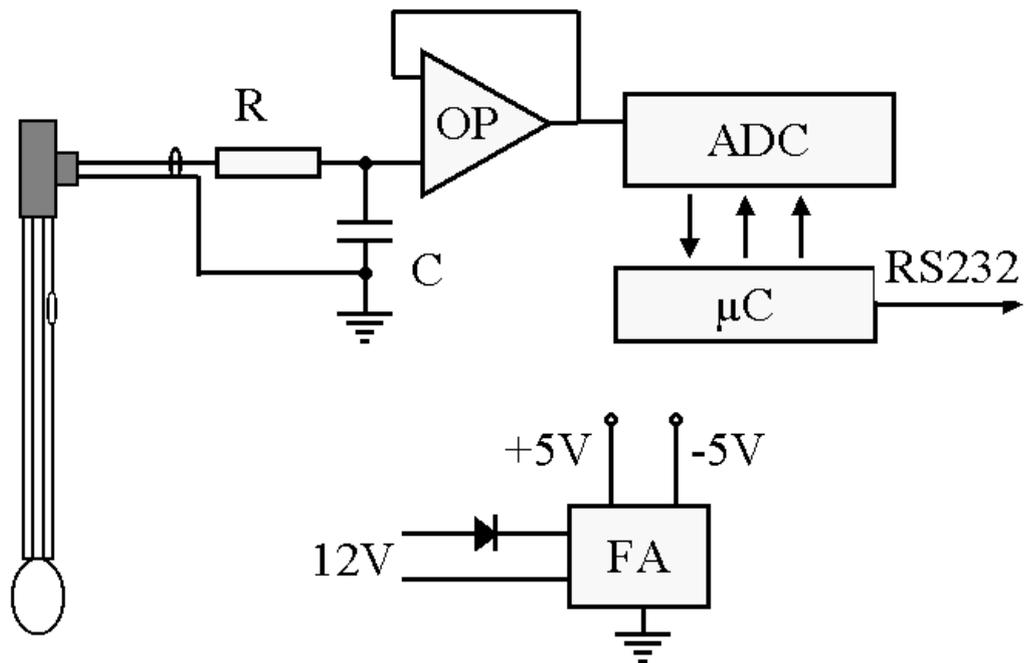
## Determinación del resto de las especies

Todas ellas son especies condensables y que, por tanto, ya han sido muestreadas con el dispositivo antes descrito. Cada una de ellas requiere un análisis en particular. Aquí sólo vamos a dar una visión general por tratarse de análisis instrumentales generales ampliamente conocidos. Especies como Na, K, Ca, Mg, Fe o Mn se determinan por espectroscopía de absorción atómica. Otros metales como Cu, Zn, Pb, Cd, Sb o Bi se determinan por voltametría diferencial de impulsos. La cromatografía en fase líquida es la técnica empleada para el análisis de B, Br, As,  $NO_3$  o  $PO_3$ .

## **Dispositivo electrónico**

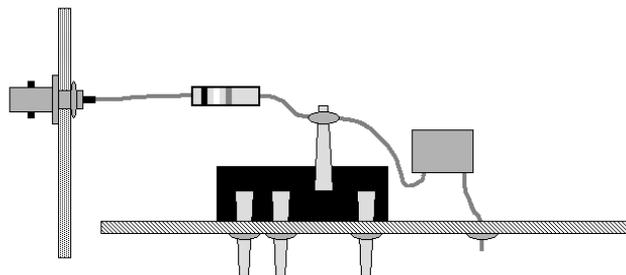
La conexión de un electrodo de pH a un computador es hoy muy sencilla, consiste en utilizar un conversor analógico digital con salida serie. Para ello podemos utilizar el clásico montaje con un conversor delta sigma de alta resolución y baja velocidad con un microcontrolador que además de proporcionar todas las señales requeridas para la operación del conversor, suministre una salida directamente compatible con el port RS232 del Pc. La alta resolución del conversor evita tener que utilizar amplificadores de la señal de entrada y especialmente cambios de escala. Solo es necesario disponer un amplificador conectado como seguidor para adaptar la impedancia del electrodo (que puede llegar a ser muy alta) a la entrada del conversor. Se puede utilizar cualquier amplificador de muy alta impedancia de entrada, como el TLC271, con determinados electrodos pueden usarse amplificadores de menores prestaciones como TL071 o

LF155. Aunque se podría trabajar con alimentación asimétrica es preferible trabajar con una alimentación doble de +5V y -5V. Esta alimentación puede realizarse fácilmente con un LM78L05 y un ICL7660 o bien utilizar un modulo integrado.



**Figura 6-15** Diagrama bloque de la electrónica necesaria para conectar un electrodo de pH a un computador. Se requiere sólo un adaptador de impedancias (OP) y un convertor analógico digital (ADC), un circuito de control  $\mu C$  que proporciona ya la salida serie compatible RS232. También hay que incluir una fuente de alimentación simétrica (FA) de +5V,0,-5V.

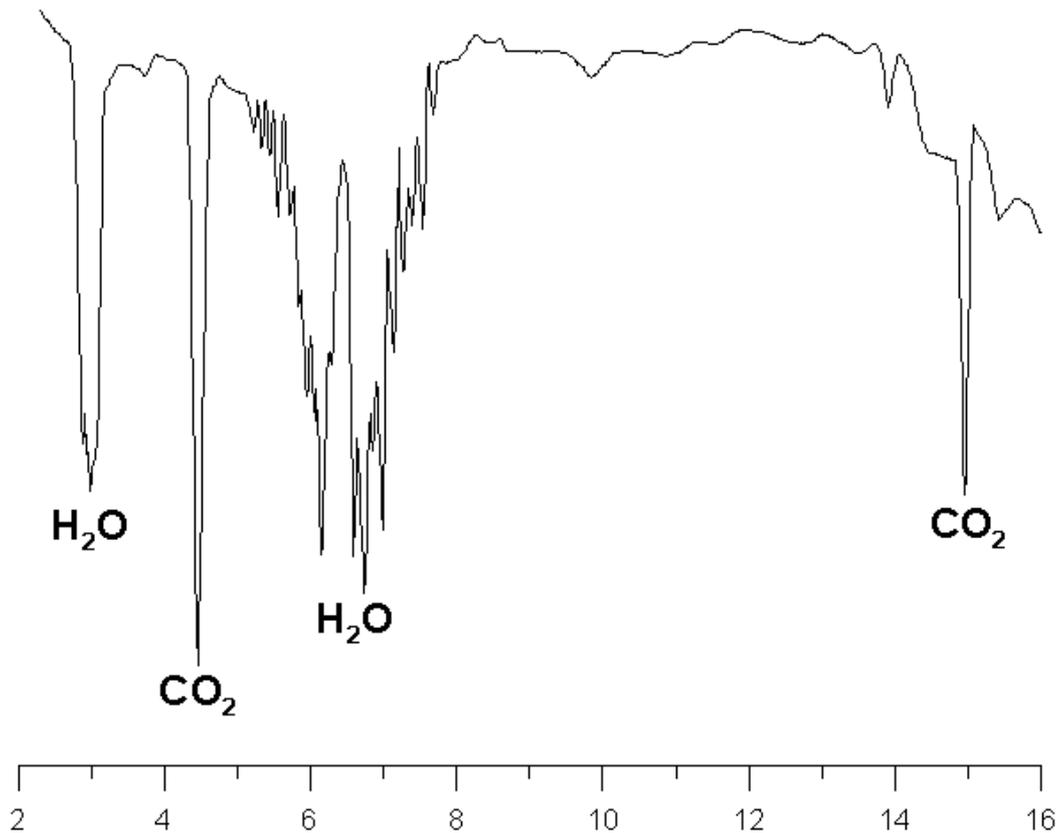
En la realización de este circuito es muy importante cuidar la entrada de la señal. A causa de la alta impedancia del electrodo es necesario eliminar al máximo toda posibilidad de fuga de corriente, por ello suele ser práctica frecuente hacer la conexión a la entrada no inversora del operacional sin utilizar el circuito impreso (doblando la patilla hacia arriba). Igualmente deberá utilizarse un conector de entrada de muy alta calidad y mantenerlo siempre limpio y seco (los laboratorios químicos suelen ser proclives a que el material se moje). Por este motivo es conveniente utilizar una caja con un nivel de impermeabilidad alto, por ejemplo IP67 y de material plástico para evitar posibles fugas de corriente. Para la conexión de los electrodos específicos se necesita utilizar un electrodo de referencia, por lo que deberemos disponer de una entrada independiente para la conexión a masa.



**Figura 6-16** La elevada resistencia interna del electrodo de pH obliga a adoptar precauciones especiales para la entrada al circuito. El conector debe ser de muy alta calidad y la conexión se realiza de forma aérea, doblando la patilla del amplificador y evitando así las posibles corrientes de fuga en la placa de circuito impreso.

## Determinación del CO<sub>2</sub> mediante detectores de infrarrojo.

Se ha observado que a distancias moderadas del volcán existe una emisión difusa de CO<sub>2</sub> que destaca sobre el fondo de origen orgánico. A estas distancias, las componentes más agresivas del gas volcánico son suficientemente pequeñas para no presentar problemas graves de corrosión en los instrumentos. Además, el CO<sub>2</sub> es posible determinarlo por absorción infrarroja mediante instrumentos sencillos y de bajo coste.

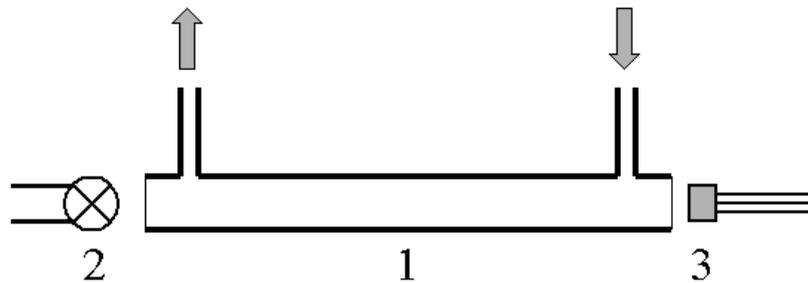


**Figura 6-17.** Absorción en la banda del infrarrojo. El CO<sub>2</sub> presenta una banda de absorción suficientemente separada para poderse medir sin interferencias con otros elementos presentes en la atmósfera (longitudes de onda en μm).

### Sensor de CO<sub>2</sub>

El CO<sub>2</sub> presenta una banda de absorción a 4.3 μm suficientemente alejada de las bandas de absorción de otras posibles componentes gaseosas del gas volcánico. A estas longitudes de onda es posible utilizar un sensor piroeléctrico de estado sólido dotado de un filtro selectivo que se encuentra fácilmente en el mercado. El efecto piroeléctrico consiste en el desplazamiento de cargas en el seno de un semiconductor cuando este recibe radiación infrarroja pero que al aumentar su temperatura vuelve al estado original. Por este motivo es necesario interrumpir periódicamente el haz infrarrojo que ilumina al sensor. De este modo a la salida obtendremos una señal periódica correspondiente al movimiento periódico de las cargas. Para facilitar su manejo, los fabricantes de sensores piroeléctricos dotan a estos de un amplificador integrado para la adaptación de impedancias. Las primeras realizaciones exigían una fuente intensa de

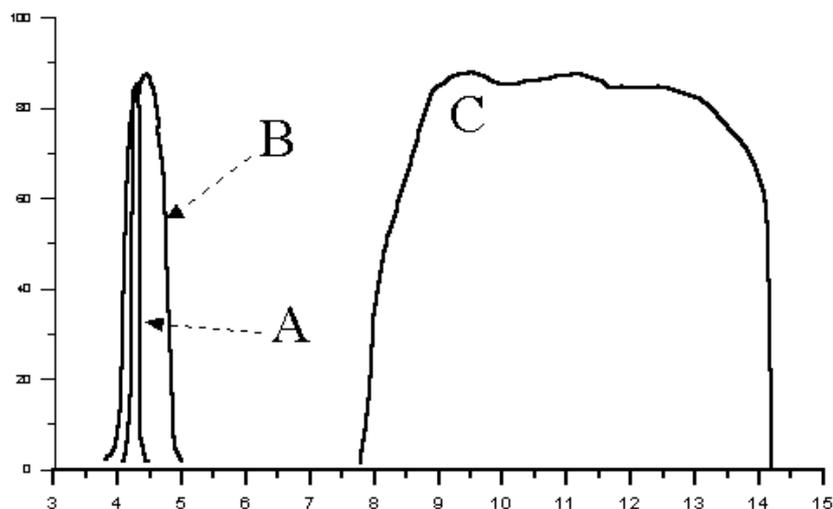
infrarrojos a  $4.3 \mu\text{m}$  y un dispositivo mecánico para interrumpir el haz. El aumento de la sensibilidad y estabilidad de los sensores piroeléctricos hace que hoy sea posible utilizar una pequeña lámpara incandescente que se ilumina periódicamente durante unos pocos segundos.



**Figura 6-16.** Fundamento de un sensor de  $\text{CO}_2$ : 1 tubo de medida por el que se hace circular el gas, 2 lámpara emisora de infrarrojos, 3 sensor piroeléctrico.

### Dispositivo de medida

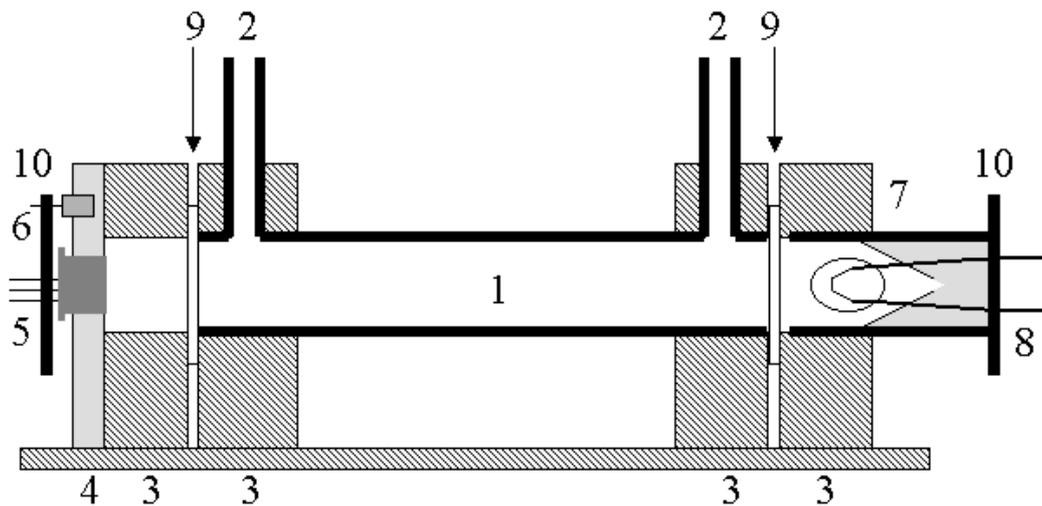
El sensor utilizado es un elemento piroeléctrico con ventana selectiva a  $4.3 \mu\text{m}$  de la firma Hamamatsu P2613-02 o el P2782-02, este último compensado en temperatura. Se ha dispuesto en el interior de un tubo de aluminio de 10 mm de diámetro interior y una longitud de 15 cm. En el otro extremo se tiene una lámpara de incandescencia de 12V y 100 mA, alimentada intermitentemente a 12V estabilizados. Esta lámpara está montada en el interior de un cono realizado en aluminio que actúa como reflector. En algunos casos es conveniente situar dos pequeñas láminas de vidrio de forma que el sensor y la lámpara no entren en contacto directamente con el gas. Hay que tener presente que la intercalación de estas láminas supone una pérdida de energía y debe compensarse utilizando una lámpara más potente. Es muy importante cuidar la perfecta alineación del sensor y de la lámpara.



**Figura 6-19.** Respuesta espectral de sensores piroeléctricos Hamamatsu. A es un filtro de banda estrecha (90 nm) centrado en  $4.3 \mu\text{m}$  específico para la detección del  $\text{CO}_2$  (P2613-02 y P2782-02), B corresponde a un filtro más ancho (600 nm) centrado en  $4.4 \mu\text{m}$  (P2613-12) y C es el filtro usado habitualmente para los detectores de presencia, que responde bien a la radiación del cuerpo humano.

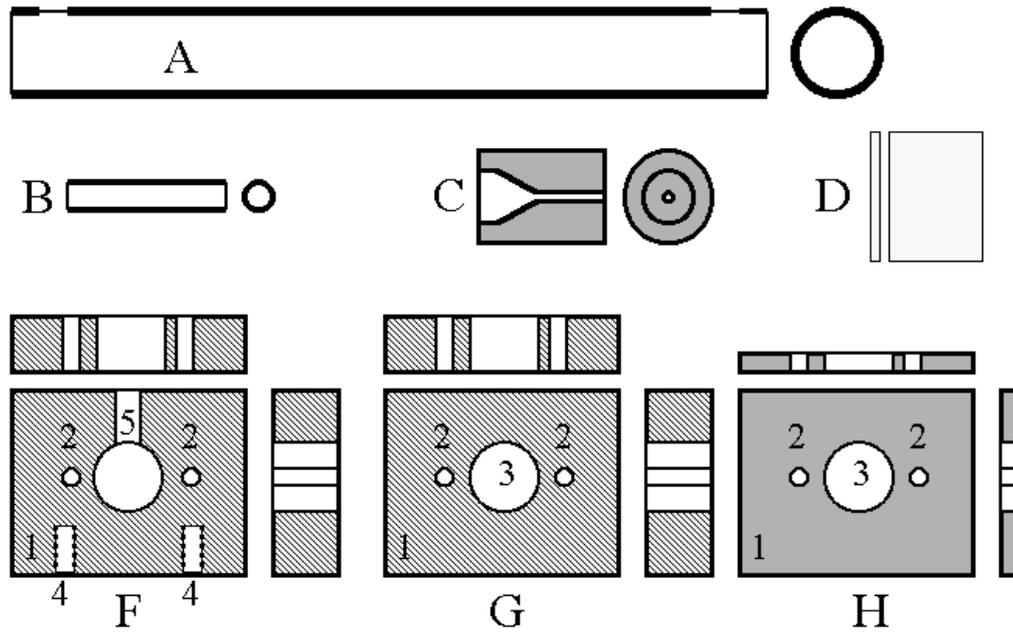
El sensor de infrarrojo y la lámpara emisora se montan sobre dos pequeños circuitos impresos que se sujetan a las dos piezas de metacrilato que sirven también de soporte al tubo. En estas dos placas de circuito impreso se colocan dos pequeños conectores que facilitan la sustitución de la lámpara. También se ha colocado un sensor LM35C para medir la temperatura del gas. La salida de LM35C va directamente al conversor analógico digital de 16 bits, mientras que para el sensor piroeléctrico debe incluirse un filtro pasa altos con una frecuencia de corte de 0.2 Hz para evitar el alto nivel de offset que presentan estos componentes. Este filtro se ha realizado mediante un amplificador operacional (TL071). Si se utilizan convertidores analógico digitales de alta resolución y alta impedancia de entrada es posible conectar el sensor directamente a la entrada del conversor.

El sistema está controlado por un PIC16F84 que proporciona directamente una salida serie RS232. También es posible conectar un módulo de adquisición de datos con una capacidad de 512 KByte y bajo consumo. Todo el sistema se alimenta a 12 V.

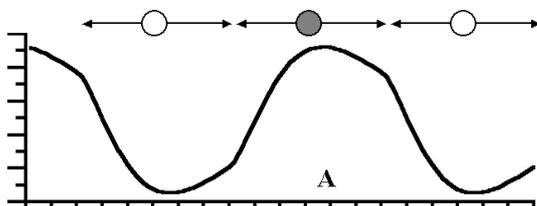


**Figura 6-20.** Realización práctica de un sensor IR de CO<sub>2</sub>. El diseño debe contemplar dos condiciones importantes: evitar que el sensor piroeléctrico se caliente por efecto de la lámpara emisora y que el sistema presente muy buena estabilidad mecánica para permitir su transporte sin desajustes. 1 cámara, 2 entrada / salida del gas, 3 soportes, 4 radiador, 5 sensor piroeléctrico, 6 sensor temperatura, 7 soporte lámpara, 8 lámpara, 9 cierres vidrio y 10 placas de circuito impreso para facilitar las conexiones a los sensores y a la lámpara.

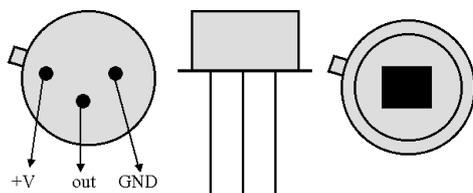
El periodo de encendido y apagado de la lámpara depende de las constantes del sensor y de las características de la lámpara empleada, por ello es conveniente realizar varios ensayos hasta conseguir la máxima señal de salida. En general se obtienen buenos resultados con ciclos de 5 a 10 segundos. La longitud de la cámara es un compromiso entre el tipo de fuente a utilizar y la gama de valores que se desea cubrir. Disminuyendo la longitud de la cámara se reduce el margen dinámico, pero se aumenta la resolución a elevadas concentraciones. Un tubo de longitud comprendida entre 150 y 250 mm presenta buenas cualidades para niveles de CO<sub>2</sub> de 500 a 10000 ppm. Valores inferiores a 500 ppm no tienen sentido ya que están demasiado próximos al atmosférico.



**Figura 6-21.** La cámara de medida esta formada por un tubo de aluminio (A) de 16 mm de diámetro interior y 120 mm de longitud. B tubos de entrada y salida de 4 mm de diámetro interior. La lámpara se encuentra en el interior de un bloque de aluminio C en el que se ha realizado un taladro cónico que actúa como espejo. Los dos extremos pueden cerrarse mediante dos vidrios finos D del tipo utilizado en microscopía aunque disminuye ligeramente la sensibilidad. Los soportes F están realizados en metacrilato de 10 mm de espesor, estando unidos mediante tornillos. El sensor piroeléctrico y el sensor de temperatura se han colocado sobre un radiador H realizado con una placa de aluminio de 4 mm.



**Figura 6-22.** La señal obtenida a la salida de un sensor piroeléctrico disminuye cuando recibe radiación infrarroja hasta alcanzar un mínimo, empezando a aumentar a pesar de que la lámpara sigue encendida. Al apagar la lámpara la señal aumenta rápidamente hasta alcanzar un máximo a partir del cual vuelve a disminuir.



**Figura 6-23.** Encapsulado del sensor piroeléctrico. Debe manejarse con cuidado, prestando especial atención a la temperatura de soldadura y a las posibles descargas de electricidad estáticas.

### Funcionamiento del sensor

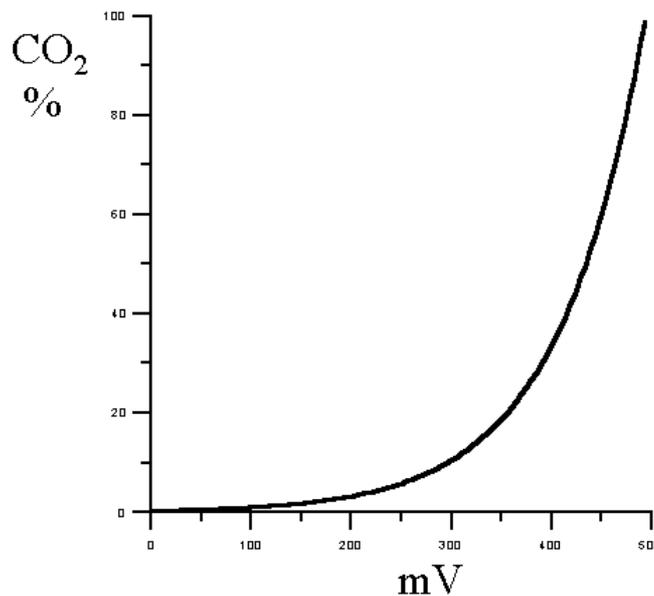
Los sensores piroeléctricos se construyen mediante un elemento semiconductor, en el cual se produce un desplazamiento de cargas cuando sobre él incide radiación infrarroja. Sin embargo en poco tiempo el sensor vuelve a su condición de equilibrio. Por este motivo es sólo sensible a cambios en la intensidad de la radiación infrarroja. La utilización práctica se hace interrumpiendo el haz infrarrojo mediante un dispositivo mecánico o bien utilizando una fuente intermitente. En este caso se utiliza una lámpara

de incandescencia que se ilumina durante dos segundos cada dos segundos. El periodo de encendido y apagado de la lámpara depende de las características del sensor y lámpara utilizados.

El mejor rendimiento se consigue ajustando el periodo hasta lograr la máxima diferencia entre el máximo y el mínimo. La diferencia entre el máximo y el mínimo es proporcional a la intensidad de la radiación recibida. Para la medida del CO<sub>2</sub> deberá utilizarse un sensor piroeléctrico que posea un filtro pasa banda centrado en la longitud de onda de absorción de 4,3 μm. En este caso, cuando no hay CO<sub>2</sub> en el sistema se obtiene el máximo voltaje ( $V_0$ ) a la salida del sistema. La presencia de CO<sub>2</sub> absorberá parte de radiación infrarroja y la señal será un valor menor V. Para un haz lineal que atraviesa una longitud x, la intensidad I recibida responde a la ley de atenuación de Beer-Lambert

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Siendo  $I_0$  la intensidad recibida sin absorción (en el vacío). En la práctica el comportamiento del sensor difiere de este modelo debido a que el haz infrarrojo utilizado no se puede considerar lineal, sino que es la superposición de muchos caminos con múltiples reflexiones en las paredes de la cámara.



**Figura 6-24** Respuesta de un medidor de CO<sub>2</sub> que utiliza un sensor piroeléctrico con filtro centrado en 4.3 μm. Obsérvese que a bajas concentraciones es donde el sistema plantea mayores problemas de calibración y compensación por temperatura.

La relación entre el contenido en CO<sub>2</sub> dado como presión parcial y la señal proporcionada por el sensor se obtiene mediante una calibración, respondiendo a una función del tipo:

$$p \text{ CO}_2 = a e^{b(I_0 - I)}$$

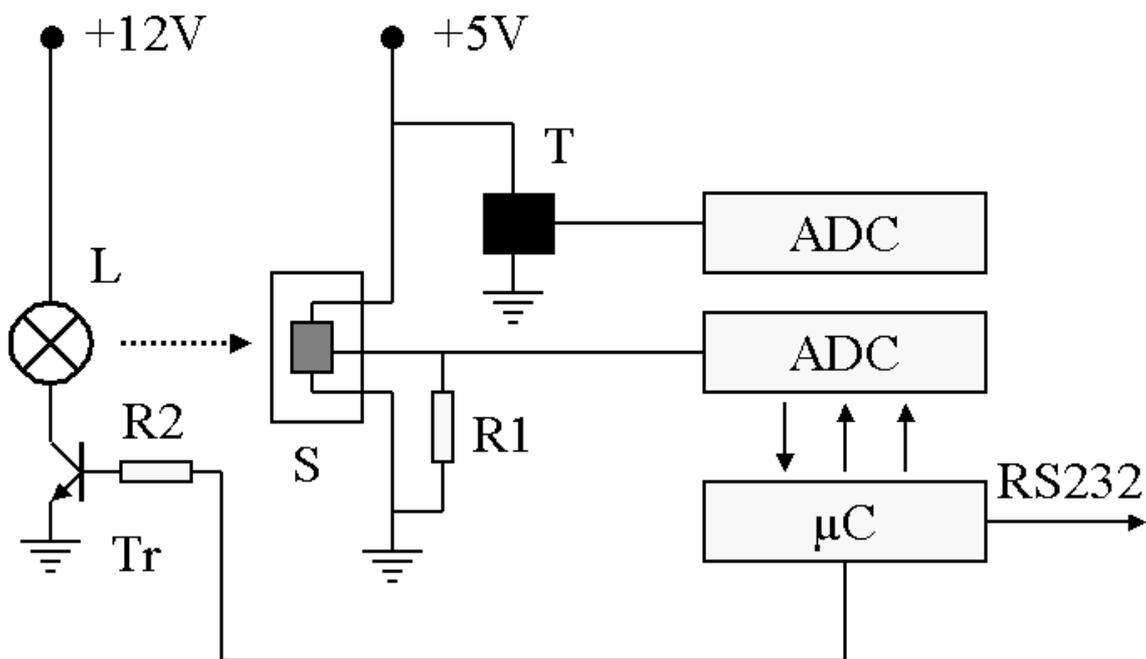
donde  $a$  y  $b$  son dos constantes determinadas experimentalmente.  $I_0$  es la intensidad sin gas (se puede obtener haciendo el vacío en la cámara) e  $I$  la intensidad obtenida en la medida del gas. El problema radica en que la determinación de  $I$  se realiza a partir de un voltaje proporcionado por el sensor en la forma:

$$I = K V$$

$K$  varía fuertemente con la temperatura ( $.2\%/^{\circ}\text{C}$ ). Por este motivo hay que disponer un termómetro muy próximo al sensor piroeléctrico y poder corregir por temperatura. Como ejemplo del orden de magnitud de las constantes mostramos una función de calibración a  $25^{\circ}\text{C}$

$$\text{CO}_2 = 0.003350 \cdot 10^{0.0050089 \cdot V}$$

El  $\text{CO}_2$  viene dado en moles % y  $V$  debe expresarse en mV.

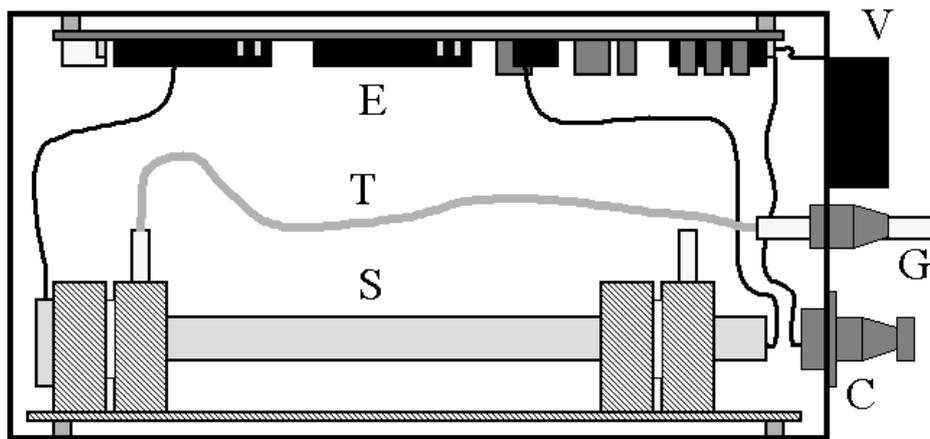


**Figura 6-25.** Electrónica asociada al sensor de  $\text{CO}_2$  por absorción de infrarrojos: S sensor piroeléctrico con ventana dotada de filtro a  $4.3 \mu\text{m}$ , R1 resistencia de carga ( $22 \text{ k}\Omega$ ), T sensor de temperatura, ADC conversores analógico digital de 16 bits,  $\mu\text{C}$  microcontrolador, Tr transistor, R2 resistencia para limitación de corriente. L lámpara, RS232 salida.

## Electrónica

La electrónica asociada es muy simple si se utilizan conversores de alta resolución, alta impedancia de entrada y que incorporen ya un filtro pasa bajos. De esta forma es posible conectar directamente los sensores piroeléctrico y de temperatura a la entrada del conversor. Así se requiere sólo un microcontrolador, que es el encargado de gestionar todo el sistema, un conversor analógico digital para el sensor piroeléctrico y otro para el termómetro. Además, se deberá incluir un transistor para el encendido periódico de la lámpara fuente de infrarrojos, una resistencia serie para limitar la corriente en la base

del transistor y otra para cargar adecuadamente la salida del sensor piroeléctrico. Es conveniente utilizar un transistor MOS como el IFR630 para controlar el encendido de la lámpara. Como sensor de temperatura se puede utilizar un LM35C que da directamente la salida en grados centígrados con un factor de escala de 10mV/°C. El microcontrolador es un PIC16F84, que al ser de tecnología flash puede re-programarse fácilmente e incluir los parámetros de calibración directamente en memoria. Los conversores son delta sigma como el AD7710 o el ADS1210. Además se requiere un sistema de alimentación que proporcione 5V para la electrónica y 12V para la lámpara. El sistema proporciona directamente una salida RS232 para la conexión a la unidad de adquisición de datos.



**Figura 6-26.** Todo el sistema se monta dentro de una caja moderadamente impermeable (IP65) en uno de cuyos laterales se dispone el tubo para la entrada del gas (G), el conector para la salida de los datos, entrada de las señales de control y la alimentación (C). Además se incorpora un pequeño ventilador para obligar al gas a circular por la cámara y extraer el calor disipado en los componentes electrónicos y especialmente por la lámpara. El sensor (S) se coloca en uno de los laterales y la electrónica (E) en el otro.

El sistema proporciona una salida serie compatible RS232 a 9600 baudios, 8 bits, sin paridad después de cada ciclo de medida. De esta forma es fácil conectar el sensor a cualquier sistema de adquisición de datos. El sistema transmite directamente las lecturas del conversor analógico digital, en formato binario. De esta forma se reduce el tráfico de datos, se simplifica la operación del sistema de adquisición de datos y los factores de calibración se aplican posteriormente, lo que permite conservar los datos originales sin manipulación. El formato de cada ráfaga es el siguiente

Byte	Contenido	Descripción
1	0x0D	Sincronismo
2	G1	ADC gas Byte bajo
3	G2	ADC gas Byte alto
4	T1	Temperatura Byte bajo
5	T2	Temperatura Byte alto

La conversión a enteros es muy simple utilizando una unión del tipo

```
static union UNIDOS
{
```

```

char caracter[4];
short int entero[2];
}cambia;

cambia.caracter[0] = G1;
cambia.caracter[1] = G2;
cambia.caracter[2] = T1;
cambia.caracter[3] = T2;
lectura_convertor_CO2 = cambia.entero[0];
lectura_convertor_temperatura = cambia.entero[1];

```

El contenido en CO<sub>2</sub> y la temperatura se obtienen aplicando las correspondientes fórmulas de traducción.

$$CO_2 = a 10^{-b} V_g$$

$$T = Kt V_t$$

siendo  $V_g$  la salida del convertor analógico digital para la medida del gas.  $V_t$  es la salida para el convertor para la medida de la temperatura. En general, estos sistemas funcionan conectados a un módulo de adquisición de datos o a un enlace telemétrico lento, a un dato por hora o incluso menos. No siendo rentable utilizar un Pc para estas funciones, especialmente por el elevado consumo en corriente que requieren.

## Calibración

La calibración de un sensor de CO<sub>2</sub> requiere conocer por lo menos dos puntos ya que debemos determinar dos constantes. La solución ideal es utilizar una colección de gases patrón (mezcla de CO<sub>2</sub> y otro gas como Ar) y hacer el ajuste por mínimos cuadrados.

Principales gases que componen la atmósfera terrestre (% volumen de aire seco)		
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	78%
Oxígeno	O <sub>2</sub>	20.9%
Argón	Ar	0.93%
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0.037%
Neon	Ne	0.0081%
Helio	He	0.000524
Agua (media)	H <sub>2</sub> O	Superior a 1

Otra posibilidad es utilizar como referencia un sensor ya calibrado y ensayar con varias proporciones de CO<sub>2</sub> en el aire de una cámara donde se colocan los dos sensores. Debe tenerse cuidado en homogenizar bien la mezcla de gases. Si se dispone de una bomba de vacío se puede determinar directamente el cero de CO<sub>2</sub> y en tal caso ya sólo se requiere una medida del sistema con contenido conocido de CO<sub>2</sub> para realizar una primera calibración del sistema. Supongamos que disponemos de las siguientes medidas:

ppm CO <sub>2</sub>		ADC (cuentas)	
G1	500	V1	5500
G2	200000	V2	2000

El parámetro  $b$  viene dado por

$$b = \frac{\log\left(\frac{G2}{G1}\right)}{V2 - V1}$$

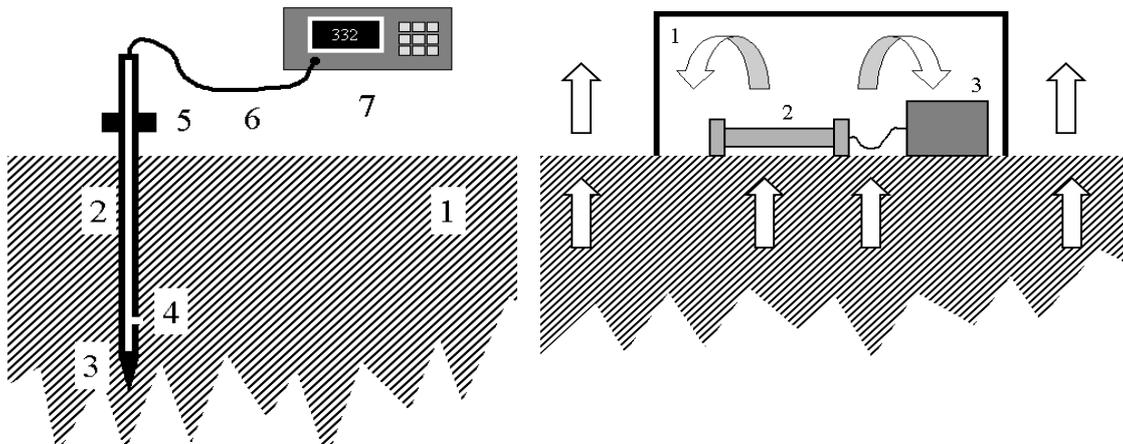
$a$  se obtiene en función de  $b$

$$a = \frac{G2}{10^{b V2}}$$

con los valores del ejemplo queda

$$a = 6136510 \quad b = -0.0007434457$$

la diferencia entre los valores típicos y los aquí obtenidos se debe a que se han utilizado directamente cuentas del conversor analógico digital en vez de milivoltios y ppm en vez de porcentaje. Evidentemente, de cuantos más puntos se disponga mejor resultará la calibración del sistema, especialmente si se tiene la precaución de elegir los puntos en la gama de valores donde se espera que trabaje el sensor. Muchas veces nos debemos limitar a utilizar el contenido medio de  $\text{CO}_2$  en el aire (primer punto) y suponer que el oxígeno se consume completamente en una combustión en ambiente cerrado.

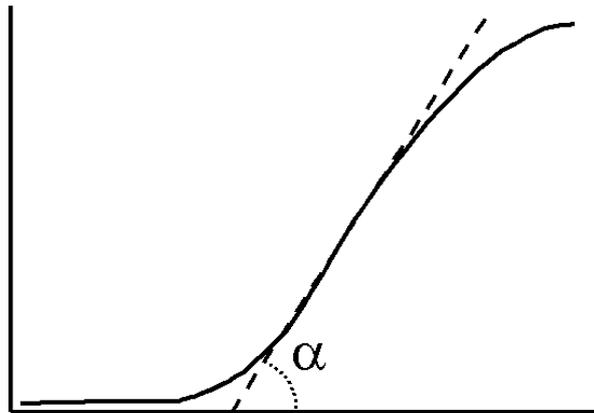


**Figura 6-27.** A la derecha se muestra el método de la sonda, compuesto por una sonda 2 que esta provista de una punta 3 y una placa de golpeo 5. Posee orificios laterales 4 para la entrada del gas y se conecta al medidor 7 mediante un tubo de goma 6. Esta técnica se puede usar sólo en suelos 1 donde sea fácil clavar. A la izquierda se presentan los elementos de una cámara de acumulación para la medida del  $\text{CO}_2$  1 cámara, 2 sensor IR, 3 electrónica.

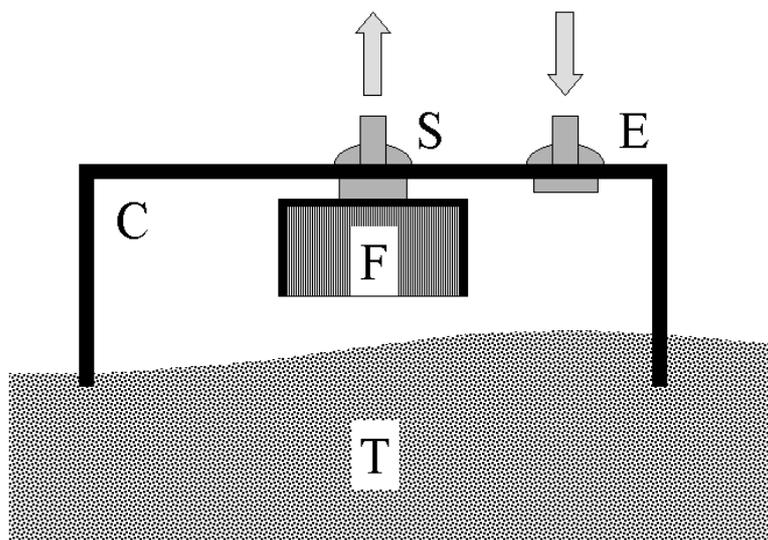
### Método de la sonda

Una forma para medir el  $\text{CO}_2$  en el suelo es introducir una sonda del orden de 40 cm, provocar una pequeña depresión y medir la concentración de  $\text{CO}_2$ . Con esta técnica se puede realizar rápidamente un mapa de concentraciones de  $\text{CO}_2$  en el suelo. Evidentemente, en rocas es muy difícil introducir la sonda. La sonda se realiza con un tubo de acero al que se le suelda una punta en la parte inferior y una placa de golpeo cerca del extremo superior para evitar que al clavarla en el suelo se deforme el extremo

y no sea posible conectar la goma para unirlo al medidor. Hay que tomar la precaución de disponer de gran cantidad de tubos, ya que se dañan fácilmente. Hay que evitar la entrada de agua o gases corrosivos al sensor. Esta consideración es muy importante cuando se trabaja en zona de fumarolas. Para ello se suele introducir un separador entre la sonda y el medidor.



**Figura 6-28.** La concentración de  $\text{CO}_2$  en la cámara va aumentando desde el instante en que ésta se cierra. Sin embargo, llega un momento donde la cámara se satura y la concentración tiende a estabilizarse. Por ello hay que tomar el valor de la máxima pendiente ( $\alpha$ ) en la curva de concentración. En las instalaciones fijas se dota a la cámara de un sistema de aireación que periódicamente renueva el aire en el interior de la cámara.



**Figura 6-29.** La cámara de acumulación es muy sencilla de construir, consta de un recipiente cilíndrico C (una cacerola por ejemplo) a la que se le colocan dos pasamuros donde se conectan las gomas para salida S y entrada E del gas. Para evitar la entrada de polvo en el detector es conveniente colocar un filtro F. La cámara se entierra parcialmente en el suelo T.

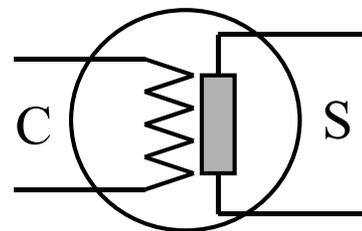
### Método de la cámara de acumulación

Esta técnica permite medir el flujo de CO<sub>2</sub> emitido por el suelo a la atmósfera. Aunque este flujo es relativamente elevado, incluso en áreas no activas, a nivel del suelo encontramos valores que poco difieren del contenido medio en CO<sub>2</sub> en la atmósfera. El método consiste en evitar que el CO<sub>2</sub> emitido por el suelo se difunda en la atmósfera, para ello se coloca una cámara cerrada que lo impide. Esta cámara de acumulación se sitúa directamente sobre el suelo y en su interior se dispone un medidor de CO<sub>2</sub> que toma medidas periódicamente, por ejemplo cada 10 segundos. Antes de colocar la cámara, el nivel de CO<sub>2</sub> es el atmosférico, una vez cerrada la cámara, la concentración de CO<sub>2</sub> va aumentando con el tiempo, la pendiente de la concentración con el tiempo nos da el flujo de CO<sub>2</sub>.

### Consideraciones sobre la medida del CO<sub>2</sub>

Los suelos emiten flujos considerables de CO<sub>2</sub> de origen orgánico. Las variaciones de presión y las precipitaciones provocan importantes variaciones en los flujos emitidos. Es importante realizar un concienzudo análisis estadístico de los datos antes de establecer cualquier hipótesis. El CO<sub>2</sub> que llega al sensor lo hace mediante un mecanismo de difusión y como tal difusión es un fenómeno lento. Por ello los instrumentos para la medida en continuo, muestrean a velocidades muy lentas, por ejemplo un dato a la hora. El instrumento puede estar en modo bajo consumo (espera), arrancar, realizar una serie de medidas hasta alcanzar la estabilidad (este tiempo depende de cada instrumento) tomar los datos y volver a la situación de espera. La transmisión de los datos puede hacerse con el mismo sistema de telemetría que se utilice para otras aplicaciones (sísmica, deformación, etc.) ya que seis Bytes por hora no supone ninguna merma en la capacidad de transmisión del enlace.

**Figura 6-30.** Sensor de gases de estado sólido. Se trata de un elemento semiconductor cuya resistencia varía con la presencia de un determinado gas. El sistema se mantiene a una temperatura elevada mediante un elemento calefactor C.

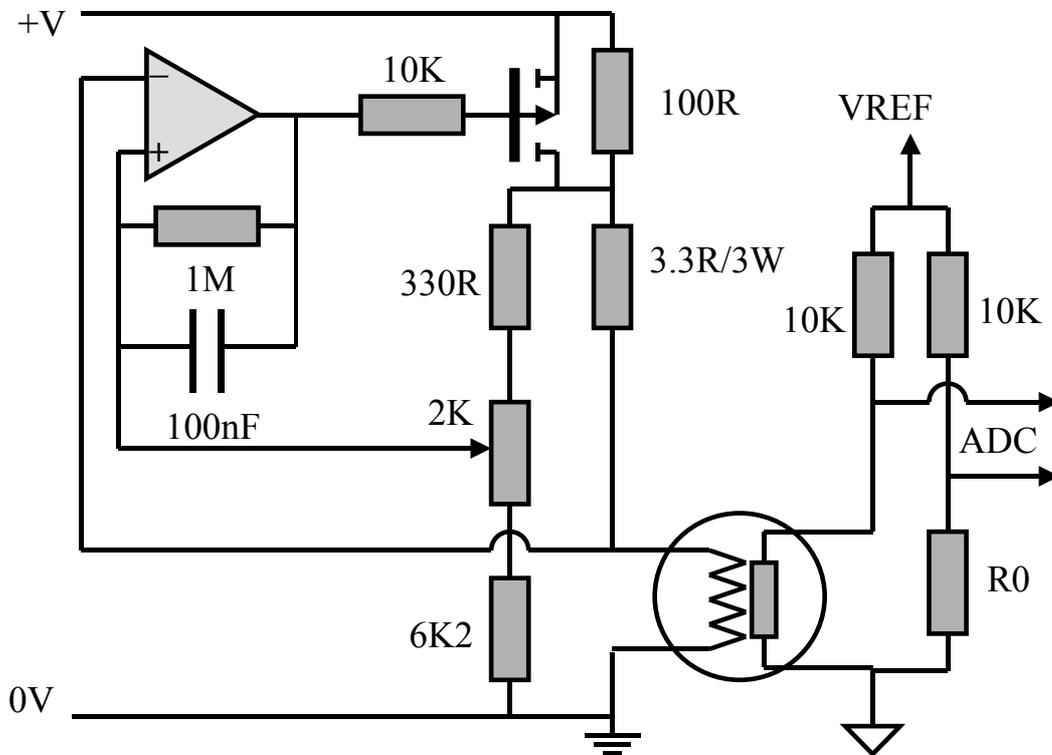


### Sensores de estado sólido para la detección de gases volcánicos

Actualmente es posible obtener sensores de estado sólido para la detección de determinados gases y se han desarrollado para el control de la contaminación industrial o para equipar sistemas de alarma. En general, estos dispositivos son de bajo coste, presentan alta sensibilidad, aunque su rango de operación es limitado y requieren una potencia relativamente elevada. Algunos de ellos son susceptibles de utilizarse para el seguimiento de la actividad volcánica, aunque ello depende de que en el volcán objeto de estudio, existan zonas con emisión de gases comprendida dentro del rango de operación del sensor.

Hay muchos tipos de sensores disponibles, especialmente para gases explosivos o inflamables. Lógicamente, en nuestra aplicación sólo se podrán utilizar aquellos que sean sensibles a los componentes mayoritarios de los gases volcánicos, tales como el H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, HCl, H<sub>2</sub>, etc o algunos que responden a la presencia de determinados gases

pero sin poder discriminar de que gas concreto se trata. Estos sensores pueden operar en ambientes muy agresivos, durante mucho tiempo (más de 8 años) y son insensibles a variaciones fuertes de humedad.



**Figura 6-31.** Circuito de control de temperatura para un sensor de gases de estado sólido. Un amplificador comparador controla la corriente de calefacción del sensor en función del desequilibrio de un puente resistivo con el elemento calefactor. El potenciómetro de 2K permite el ajuste del punto de trabajo del puente. Un segundo puente alrededor del elemento sensor proporciona una señal diferencial adecuada a la entrada del conversor analógico digital. (NOTA los valores de las distintas resistencias dependen del tipo de sensor utilizado.)

### Principio de operación

Los sensores más extendidos se basan en utilizar un elemento semiconductor cuya resistencia varía en presencia de un determinado gas. Para su correcta operación el semiconductor debe mantenerse a una temperatura elevada y constante, para lo que lleva incorporado un elemento calefactor de platino. Para su operación requiere un circuito de control y una potencia relativamente elevada. El sensor requiere un tiempo de precalentamiento del orden de un minuto, siendo conveniente mantenerlo en funcionamiento continuo si se quiere obtener una alta sensibilidad. El circuito para el control de la temperatura del sensor utiliza el propio elemento calefactor de platino como termómetro. Para ello se dispone de un montaje en puente, con un amplificador comparador que controla la corriente de calefacción. Por ejemplo, para un sensor de SO<sub>2</sub> (Capteur Sensors GS22) la resistencia de calefacción a 25 °C es de 4.67 Ω y de 14 Ω a la temperatura de operación de orden de 400 °C. Estos valores varían ligeramente de un tipo de sensor a otro por lo que se requiere realizar un ajuste una vez montado todo el dispositivo o bien adquirir el sensor con el circuito de calefacción preajustado.

La potencia media necesaria es del orden de 600 mW. El elemento sensible posee un resistencia en aire limpio de 25 k $\Omega$  que aumenta con el contenido de SO<sub>2</sub> siendo de 38 k $\Omega$  con una concentración de 10 ppm. Es conveniente mantener la corriente de medida por debajo de 5  $\mu$ A. Un sencillo montaje en puente permite obtener la señal diferencial adecuada a la entrada de un conversor analógico digital del tipo delta-sigma.

### Características de los sensores

Las siguientes tablas recogen las características de una serie de sensores susceptibles de utilizarse en el seguimiento de la actividad volcánica.

Capteur Sensor GS22	
SO <sub>2</sub> ppm	Resistencia (k $\Omega$ )
0	25
3	33
5	35
10	38

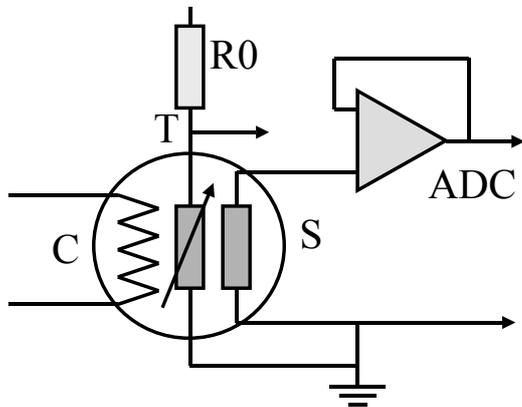
Capteur Sensor GS05	
H <sub>2</sub> S ppm	Resistencia (k $\Omega$ )
0	25
25	114
50	150
100	230

Capteur Sensor GS22	
HCl ppm	Resistencia (k $\Omega$ )
0	2
1.5	195
3	295
5	415

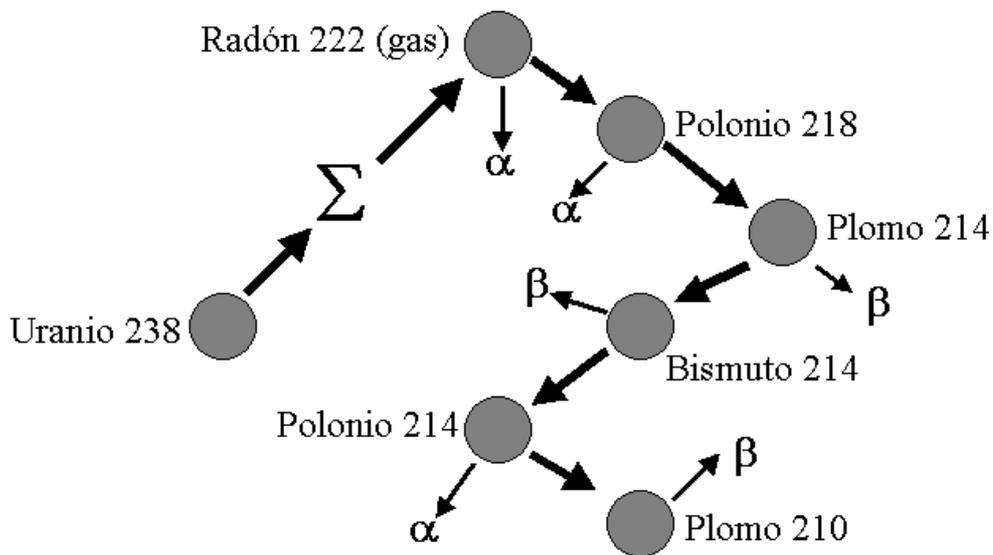
### Otros sensores

Recientemente se han introducido en el mercado otro tipo de sensores, basados en procesos electroquímicos que permiten detectar otros gases. En particular es interesante para el seguimiento de la actividad volcánica el sensor FIGARO TGS4160 que permite detectar CO<sub>2</sub> en un rango de 400 ppm a 5000 ppm. Se trata de un sensor híbrido desarrollado para el control de sistemas de ventilación o de procesos de fermentación. Está constituido por un electrolito sólido contenido entre dos electrodos, un elemento calefactor y un termistor. La fuerza electromotriz que aparece entre los electrodos depende de la concentración de CO<sub>2</sub>. El termistor permite controlar la temperatura de calefacción. Este sensor constituye una solución económica y sencilla al problema de la medida de la emisión difusa de CO<sub>2</sub> en volcanes y especialmente para construir alarma donde existen situaciones en las que pueda superarse fácilmente el máximo permisible. Sin embargo, no pueden competir en precisión ni en tiempo de respuesta con los sensores de absorción en infrarrojo, a los que supera en términos de vida esperada (10

años). El sensor requiere una corriente de calefacción de 250 mA a 5V. La señal de salida, cuando la concentración de CO<sub>2</sub> pasa de 400 ppm a 5000 ppm, es de 80 mV. En aire atmosférico (aproximadamente 400 ppm de CO<sub>2</sub>) la salida del sensor presenta un offset de 300 mV. El tiempo de respuesta del sensor ante un cambio en la concentración de CO<sub>2</sub> es del orden de 2 minutos. Requiere un tiempo de precalentamiento relativamente importante, por lo que es conveniente mantenerlo en funcionamiento continuo.



**Figura 6-32.** Sensor híbrido para la detección de CO<sub>2</sub>. Se requiere un amplificador operacional de muy alta impedancia de entrada como el TLC271 para poder acoplar el sensor al conversor analógico digital. Si se quiere utilizar un conversor de baja resolución se debe añadir una etapa amplificadora. El termistor T, que esta polarizado mediante una resistencia R0, se utiliza para compensar la deriva térmica del sensor. El elemento calefactor C consume 250 mA a 5V.



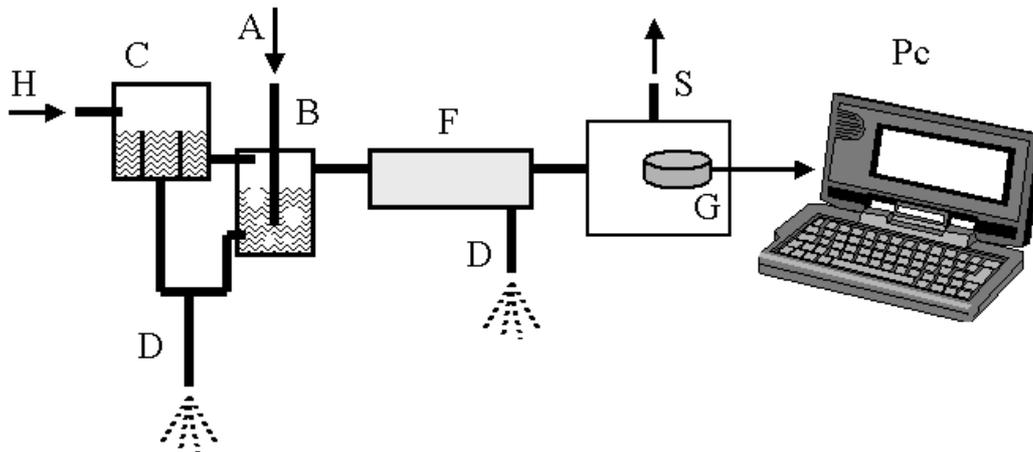
**Figura 6-33.** El gas Radón 222 aparece, entre otros elementos ( $\Sigma$ ) en la desintegración del Uranio 238 y tiene una vida media de 3.8 días.

### Medida del Radón

La medida del Radón aparece generalmente asociada en volcanología, a la medida de los gases tradicionales como son los compuestos de azufre o de carbono. Sin embargo, las técnicas de medida involucradas y especialmente el análisis de los datos, difiere considerablemente de las otras especies. En primer lugar el radón es un gas noble que procede de la desintegración de elementos radioactivos como el radio, el uranio o el torio y es a su vez un elemento radioactivo que se desintegra con una vida media del orden de tres días, dando a su vez otra serie de elementos radioactivos que también se

desintegran. Por otra parte las fluctuaciones de radón se consideran un precursor débil, es decir que la proporción de aciertos es muy inferior a la de falsas alarmas y falta de alarmas. Por ello sólo es aconsejable invertir en un sistema de seguimiento de la emisión del radón si se tienen ya adecuadamente cubiertos los otros aspectos de la vigilancia volcanológica.

Las distintas técnicas de medida del radón consisten en detectar las sucesivas desintegraciones. Lo más correcto es detectar directamente la partícula  $\alpha$  que emite el radón. El dispositivo instrumental clásico utiliza una pantalla de sulfuro de zinc y un fotomultiplicador. Sin embargo esto es relativamente complejo y por ello habitualmente se detectan las desintegraciones de sus descendientes, mucho más fáciles de medir y para lo cual es suficiente un simple tubo Geiger-Müller. Este método presenta la desventaja de que además de los hijos del radón podemos estar viendo otros muchos elementos, pero si lo único que se pretende es poder detectar emisiones extraordinarias de radón, esto carece de importancia ya que el dispositivo de medida está fijo en un punto y la contribución de los elementos radioactivos presentes en el entorno se puede considerar constante.

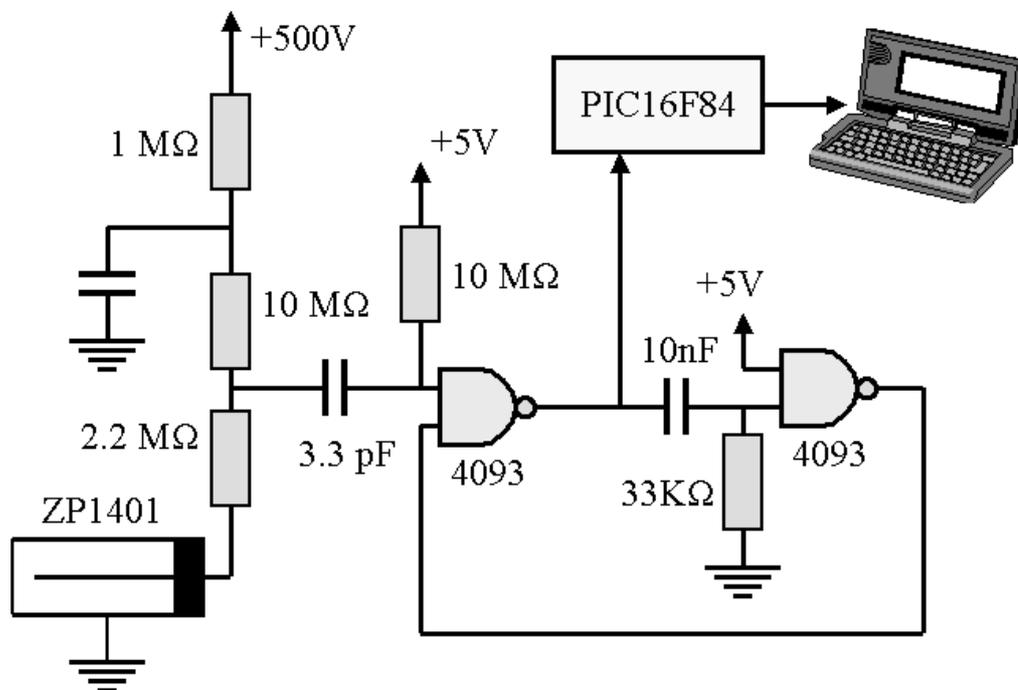


**Figura 6-34.** Montaje para la medida del contenido en radón en el agua. El agua entrante H se envía a un depósito regulador C. Un flujo constante entra en un separador B donde se hace borbotear aire que arrastra el gas hacia un filtro F a cuya salida se encuentra el detector que puede ser una cámara de centelleo o un simple tubo geiger. D son los sistemas de descarga del agua sobrante.

Otra técnica, pero que sólo sirve para estudiar las fluctuaciones de radón a largo plazo es la basada en registrar los impactos de las partículas  $\alpha$  en una película sensible. Periódicamente se retiran las películas y se cuentan los impactos. A pesar de su simplicidad, es un método que permite realizar exploraciones de amplias zonas, con muchos puntos de muestreo a un precio muy competitivo. Sin embargo, para vigilancia el periodo de muestreo es demasiado grande y amortigua excesivamente los picos de emisión. En exploración se utilizan frecuentemente asociadas a las trampas alcalinas. En realidad es conveniente implementar todas estas técnicas que requieran la visita periódica de la estación simultáneamente, pues el coste es el mismo se realice una operación o varias y la información que se obtiene es mucho mayor. Una técnica similar consiste en emplazar trampas con carbón activo – un tubo relleno de carbón activado por el que circula el gas - que captura a los descendientes del radón, que son posteriormente analizados en el laboratorio mediante espectroscopia gamma. Este método tiene la ventaja de ofrecer una mejor descripción de los elementos radioactivos

que intervienen y cuando se produce un pico significativo se puede estimar el tiempo transcurrido. Otro problema es la correcta interpretación de las anomalías de radón. Es frecuente la aparición de importantes picos que suelen confundirse con una emisión extraordinaria y no son otra cosa que deposición atmosférica. Por ello es conveniente disponer de varios detectores de forma que tengamos siempre algunos de ellos fuera de las áreas anómalas y puedan servir de referencia. También es importante que se controlen los parámetros atmosféricos, especialmente la presión y la precipitación.

En la naturaleza aparecen varios isótopos del radón, el Rn222 procede de la desintegración del uranio y tiene una vida media de 3,8 días, el Rn220 procede del torio y su vida media es de 55 segundos y el Rn219, hijo del actino con una vida media de solo 4 segundos. A efectos prácticos, el gas pasa por una serie de filtros antes de llegar a la cámara de medida, invirtiendo normalmente varios minutos en ese recorrido, por lo que la concentración de radón 220 y 219 decae considerablemente y se puede considerar que la actividad medida corresponde solo al Rn222.



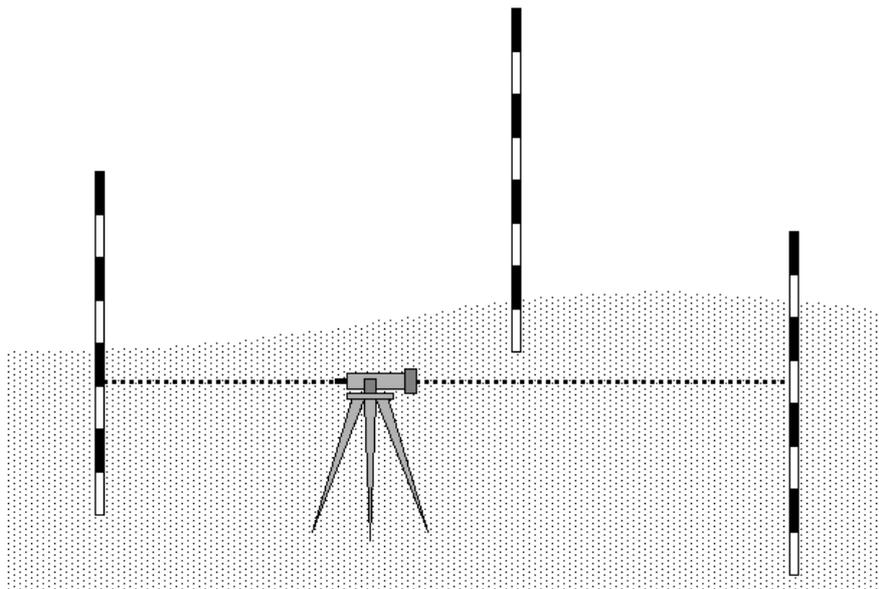
**Figura 6-35.** Un simple tubo Geiger, con ventana de mica puede servir para detectar radón. El circuito corresponde a un montaje que utiliza el tubo ZP1401 de bajo coste. Un microcontrolador PIC16F84 sirve de interfase con el sistema de adquisición de datos. El empleo de un tubo con una ventana mayor mejora, evidentemente, la eficiencia del instrumento.

Finalmente, hay que recordar que la limpieza es un factor primordial en todas las determinaciones de elementos químicos, pero es mucho más crítica cuando se trata de determinaciones de procesos radioactivos. La corrosión o deposición en los elementos sensibles, como son los recubrimientos de las cámaras de centelleo o ventanas de los detectores, junto a la presencia de altas tensiones, hacen que este tipo de instrumentos este especialmente sujeto a fallos. Los filtros deben sustituirse frecuentemente.

# MEDIDA DE DEFORMACIONES

## Métodos geodésicos. Introducción

La medida de las deformaciones en una zona volcánica activa se ha convertido en estos últimos años en la técnica favorita para la vigilancia de volcanes y la predicción de erupciones. Las técnicas utilizadas son las habituales en geodesia de primer orden y por ello aplicadas rutinariamente por los equipos topográficos. Por esta razón no es fácil encontrar libros donde se exponen los métodos prácticos utilizados en cada caso. La instrumentación requerida debe ser de muy alta precisión, es decir la utilizada en geodesia de primer orden, los teodolitos y niveles utilizados habitualmente en topografía *no sirven*, pues deberemos alcanzar resoluciones superiores al mm/km en tramos de varias decenas de km. Lógicamente, cuando el volcán está ya en un estado avanzado de crisis las deformaciones son lo suficientemente grandes para poderse medir con equipos de bajo coste. En las próximas páginas presentaremos un breve esquema de las metodologías que se utilizan en volcanes conocidos, que deberán adaptarse siempre a los instrumentos disponibles y a la rutina observacional del equipo de geodestas que se encarguen del monitoreo de nuestro volcán. Igualmente, el coste de los instrumentos es muy elevado, pero pueden compartirse con otras instituciones.



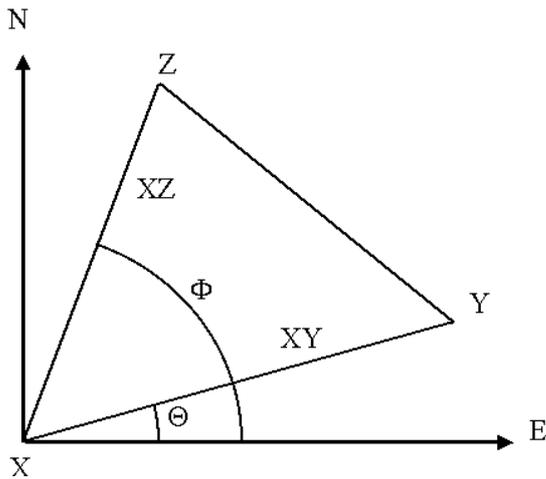
**Figura 7-1.** Una de las técnicas más difundidas para controlar la deformación en un volcán activo es el triángulo de nivelación (*Dry-Tilt*). Consiste medir los cambios de inclinación mediante la nivelación periódica de triángulos de 30-60 m de lado. Es importante la señalización mediante hitos que permitan reinstalar las miras en los mismos puntos con alta precisión.

## Medida de la inclinación

La nivelación de precisión es la técnica más barata y fácil de implementar para el monitoreo de las deformaciones que se producen en una zona volcánica activa, habiéndose desarrollado dos metodologías básicas: la medida de inclinaciones y el itinerario de nivelación. La primera permite conocer los cambios de inclinación que se

producen cerca del volcán y requiere disponer sólo de pequeñas zonas relativamente planas, la segunda detecta la presencia de movimientos verticales, pero exige poder realizar itinerarios de relativa longitud y sin demasiados cambios de alturas.

La medida de inclinaciones en la vigilancia de volcanes es ya tradicional, utilizándose inicialmente niveles de agua observados visualmente, posteriormente se desarrolla un método geodésico que permite alcanzar resoluciones similares utilizando niveles ópticos. Por contraposición al nivel de agua, a estos métodos se les denominan niveles secos (*Dry-Tilt*), aunque actualmente se está imponiendo la denominación de nivelación de montaje único (*SSL single setup leveling*).



**Figura 7-2.** Es fundamental utilizar unos criterios muy estrictos para identificar los puntos y las medidas. La figura muestra la nomenclatura utilizada para la medida de la deformación en inclinación por el método del (*Dry-Tilt*)

La configuración más clásica para la medida de inclinaciones mediante este método consiste en nivelar con alta precisión un triángulo equilátero de 30-60 m de lado. Lo primero que debe hacerse es buscar una zona de 40m x 40m y además con desniveles menores que la longitud de las miras de invar y con suficiente estabilidad para poder marcar en ella permanentemente los puntos de nivelación. Seguidamente se sitúa el nivel en el centro del triángulo, nivelándose cuidadosamente los tres puntos. Siempre que sea posible se utilizarán tres miras simultáneamente, que se fijan al terreno mediante trípodes. La operación con dos miras requiere el cambio de miras, lo cual lleva mucho más tiempo y deben extremarse las precauciones de emplazamiento de las miras, ya que cuando se han cambiado varias veces de emplazamiento, bajo condiciones meteorológicas adversas la fatiga hace cometer errores que luego prolongan todavía más el proceso de medida. En caso de viento, cosa frecuente en los volcanes de cierta altura, es muy difícil alcanzar la precisión requerida para poder detectar las deformaciones inducidas por la actividad volcánica. Dado que la llegada a la zona y la puesta en estación del nivel son las operaciones que requieren más tiempo, es práctica habitual emplazar un hexágono en vez de un triángulo. De esta forma es posible detectar errores de medida y deformaciones debidas a efectos locales.

Los vértices se denominan X, Y, Z siendo X el situado más al Sur, Y y Z se definen girando en sentido contrario a las agujas del reloj. Los ángulo  $\Theta$  y  $\Phi$  están definidos desde el punto X como Este X Z y Este X Y respectivamente. Si X, Y, Z son las tres miras, el procedimiento observacional es el siguiente

Diferencia X - Y						Diferencia X - Z						Diferencia Z - Y					
Y	X	X	Y	Y	X	Z	Z	X	X	Z	Y	Y	X	X	Y		

Al final de cada serie se debe comprobar la coherencia entre los datos. La última lectura de cada grupo es la primera lectura del grupo siguiente.

La reducción de los datos de campo nos da la diferencia de alturas entre los distintos puntos, pero ello no significa nada, el objetivo es calcular la variación de inclinación que está experimentando la zona, para lo cual hay que compararlo con las medidas del mismo triángulo realizadas anteriormente. Además hay que expresar esta deformación de modo que sea posible comparar las medidas realizadas en varios triángulos. El vector de inclinación se determina mediante las fórmulas

$$\tau_N = \left[ \left( \frac{-\cos \Phi}{X Y} \operatorname{sen}(\Phi - \Theta) \right) \Delta(Y - X) - \left( \frac{\cos \Theta}{X Z} \operatorname{sen}(\Phi - \Theta) \right) \Delta(X - Z) \right] 10000$$

$$\tau_E = \left[ \left( \frac{\operatorname{sen} \Phi}{X Y \operatorname{sen}(\Phi - \Theta)} \right) \Delta(Y - X) - \left( \frac{\sin \Theta}{X Z \operatorname{sen}(\Phi - \Theta)} \right) \Delta(X - Z) \right] 10000$$

que nos dan el cambio de inclinación en microrradiares en dirección Norte y Este y donde XY es la distancia horizontal en metros entre el punto X y el punto Y, XZ análogamente entre Z y X, (Y-X) es la variación experimentada por la diferencia de alturas en metros entre los puntos Y, X y lo mismo para (X-Z). El error de cierre viene dado por

$$\delta = (Y - X) + (X - Z) + (Z - Y)$$

La inclinación viene dada por

$$\tau = \sqrt{\tau_N^2 + \tau_E^2}$$

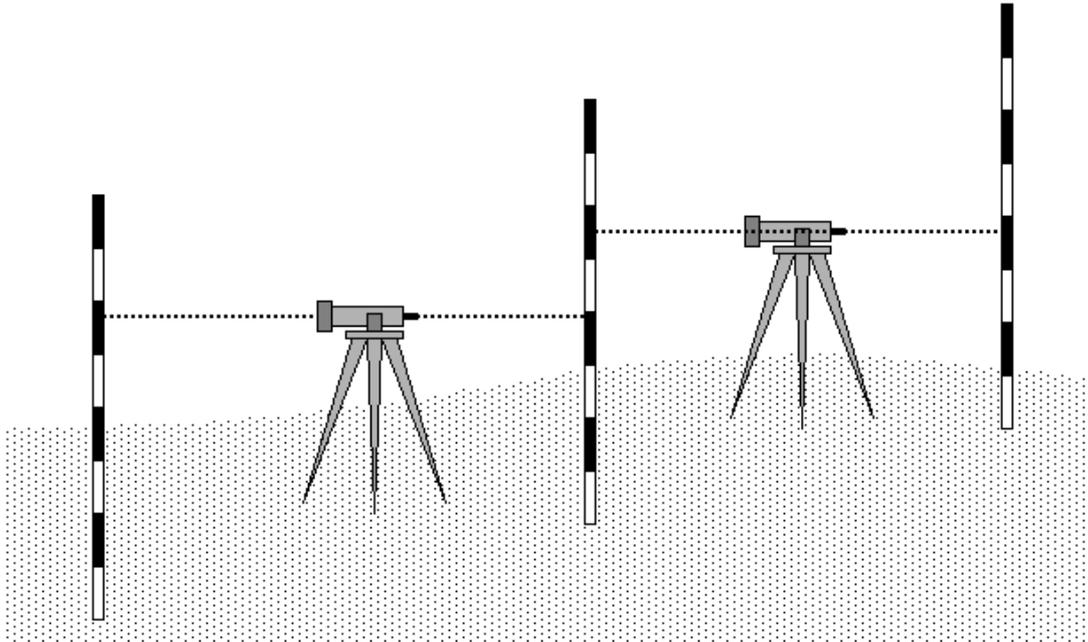
el azimut es

$$\alpha = \arctan \left( \frac{\tau_E}{\tau_N} \right)$$

Cuando los desniveles son importantes, más de 2 m en 50 m, no es posible nivelar con nivel y mira, salvo intercalando puntos intermedios que nos introducen errores considerables, lo que nos impide trabajar en los flancos del volcán. Además, el traslado de las miras invar de 2 ó 3 m no es sencillo, no pudiéndose utilizar vehículos pequeños. Una alternativa es la utilización de un teodolito, aplicando lo que se denomina nivelación trigonométrica o SSTL (*simple setup trigonometric leveling*).

La nivelación trigonométrica utiliza un teodolito para nivelar los puntos que constituyen el triángulo. Una variante utiliza distanciómetros montados sobre teodolitos y prismas reflectores láser en vez de miras, de esta forma se posibilita el trabajar sin tener que transportar las engorrosas miras. Además, los prismas láser son baratos y se pueden dejar fijos en muchos puntos, lo que simplifica la operación. Es más laboriosa que la

técnica clásica que utiliza un nivel para alcanzar las mismas resoluciones. Sin embargo, puede implementarse en zonas con grandes desniveles. Además si la deformación es importante, la distancia entre puntos puede extenderse hasta 200 m, aunque la resolución del método disminuye rápidamente por encima de los 100 m, especialmente por causa meteorológicas. El sistema operacional es el mismo, salvo que ahora lo que medimos son ángulos. Las alturas se calculan multiplicando las distancias por los cosenos de los ángulos cenitales. El principal problema de la aplicación de este método es que un teodolito de la precisión requerida es mucho más caro que el dispositivo completo de nivelación.



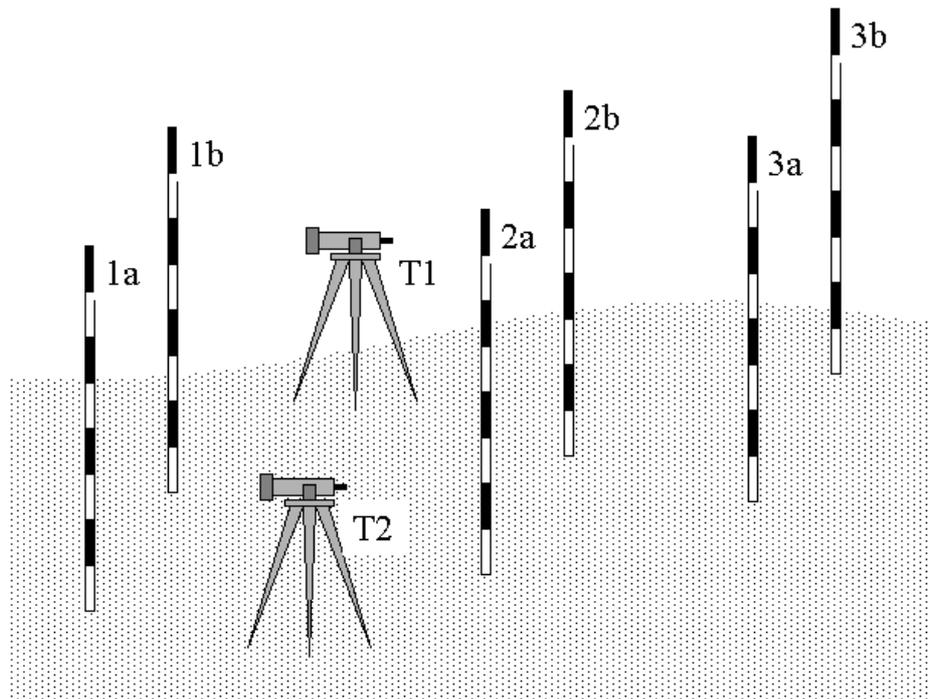
**Figura 7-3.** Otra técnica habitual es la nivelación de alta precisión. Es importante tratar de hacer itinerarios a cota constante para tratar de minimizar los errores.

La selección de los emplazamientos de estos dispositivos de nivelación se hace de forma que uno de los lados esté orientado en la dirección en la que se espera la mayor deformación, y el otro vértice se sitúa en un punto de acceso cómodo, compatible con la precisión de la medida. De esta forma, se puede tener una idea de la magnitud de la deformación directamente con la medida de la diferencia de alturas. Es importante elegir los emplazamientos de forma que sólo se deformen por la acción del volcán. Mucho cuidado con las laderas inestables o los suelos impregnados en agua o helados. Lamentablemente, los volcanes son como son y los puntos de medida se ponen donde se puede. La instrumentación requerida debe ser capaz de resolver  $6 \times 10^{-3}$  cm en las diferencias de cotas, lo que exige miras de invar y niveles como el WILD N3.

### Nivelación

La siguiente técnica geodésica que se utiliza en la vigilancia de volcanes es la nivelación de precisión. Lo más importante cuando se decide a implementar esta técnica es definir bien los itinerarios. Estos deben cruzar las zonas activas, pero siguiendo una vía de comunicación y sin tener que superar grandes desniveles. De otro modo, la aplicación práctica resulta excesivamente cara o bien la precisión del método se reduce

considerablemente a causa del elevado número de puntos de apoyo necesarios. Nivelación de precisión: Se deben tomar las precauciones adecuadas para que el error sea inferior a 1mm / km. En zonas de fuerte pendiente los puntos deben estar próximos. Por ello es habitual realizar itinerarios rodeando al volcán a cota constante. Es importante llevar un control de la temperatura para poder realizar la corrección por refracción. El control de los efectos locales y de los errores es fundamental para alcanzar la precisión requerida. Una técnica muy utilizada consiste en nivelar con dos equipos simultáneos.



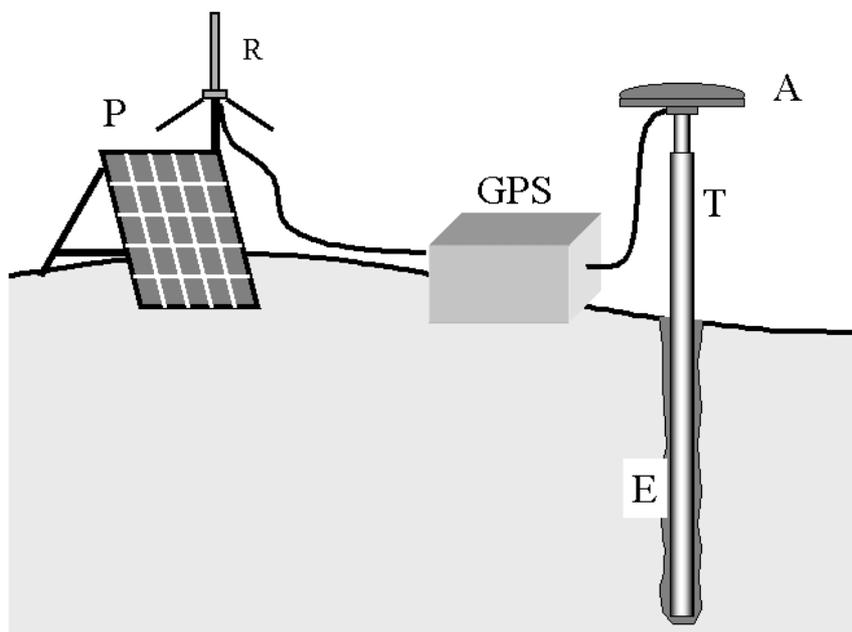
**Figura 7-4.** nivelación con dos equipos simultáneos: El nivel T1 nivela la serie 1a, 2b, 2a, 1b; mientras que el nivel T2 realiza la serie inversa 2a, 1b, 1a, 2b. El disponer de otro juego de miras, 3a y 3b, permite optimizar el proceso de medida al disminuir los tiempos de emplazamiento.

## Red geodésica

El control de las grandes estructuras volcánicas, como puede ser una caldera, requiere la utilización de una red geodésica capaz de abarcar todo el edificio volcánico y poder controlar cualquier deformación que en él se produzca. Las distancias a cubrir serán del orden de unos pocos kilómetros (1 a 15 km), que deberán medirse con precisiones del orden de 1mm. Las nuevas tecnologías de distanciómetros electrónicos (EDM *electronic distance meter*) permiten ya conseguir estos órdenes de magnitud. El sistema GPS (*Global Position System*) operando en diferencial y con dos frecuencias puede ya utilizarse en ciertos casos aunque su precisión todavía no es suficiente, especialmente en altura, el costo de los equipos de elevadas prestaciones es muy elevado y además está sujeto a restricciones militares. La gran ventaja del sistema GPS es que no requiere visión directa entre los puntos a medir. Las redes geodésicas tradicionales, observadas con distanciómetros electrónicos y teodolitos de elevada precisión se diseñan de forma que se pueda medir desde la periferia del volcán una serie de marcas situadas en sus laderas, de esta forma la red se puede observar durante los períodos de crisis, sin

exponer a los observadores a un riesgo excesivo. Otras redes, diseñadas para observar las pequeñas deformaciones que se producen en los períodos de relativa calma del volcán, se diseñan de forma que el error sea mínimo.

Ninguna de las técnicas para el control de la deformación es mejor que otra, suponiendo que se disponga de la instrumentación adecuada para aplicar todas ellas, será la topografía del volcán y la red viaria lo que decidirá que técnica hay que aplicar. Hay que pensar que, en caso de crisis, los datos tienen que estar disponibles en poco tiempo, y una nivelación de precisión de una decena de km por terreno abrupto puede requerir más tiempo del disponible. Por ello, las pequeñas figuras de nivelación SSL o SSTL y las líneas cortas serán preferibles en la mayoría de los casos. Sin embargo, cuando un gran aparato volcánico entra en crisis, serán las redes geodésicas las únicas que permitirán controlar, desde la periferia y sin exponer demasiado a los operadores, la actividad del volcán.



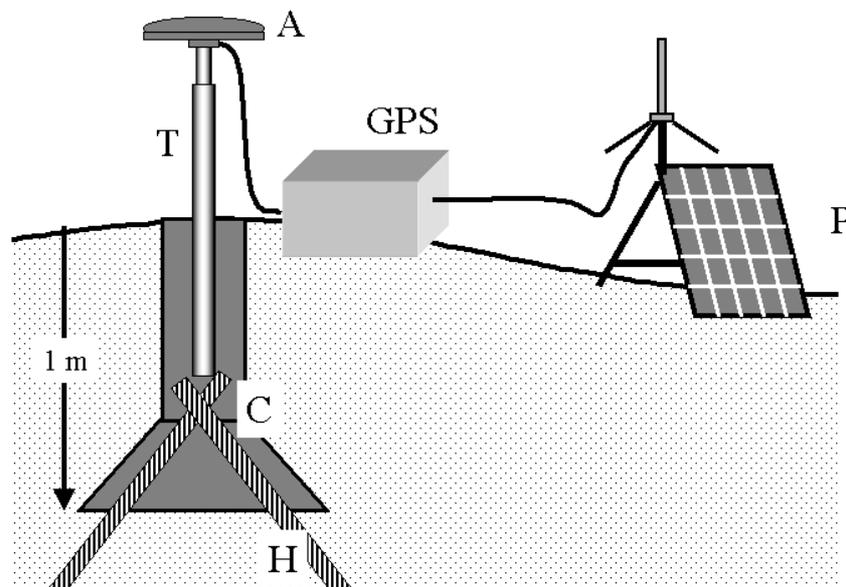
**Figura 7-5.** La instalación de una estación GPS de registro continuo es muy sencilla en roca: basta con hacer un taladro en la roca, meter un tubo T y pegarlo con una resina epoxi E. En el tubo se rosca la antena A. El receptor GPS y la electrónica asociada se encierra en una caja hermética. Un panel solar P proporcionan la energía necesaria. La antena de comunicaciones se puede instalar utilizando el mismo soporte del panel solar.

## Redes GPS

Desde su aparición el sistema GPS se ha aplicado al estudio de la deformación en volcanes activos, sin embargo, durante muchos años esta era una opción tremendamente costosa, ya que para poder alcanzar precisiones centimétricas era necesario disponer de receptores de alta precisión, y evidentemente, de un coste que no podían asumir los observatorios. Durante estos años, la técnica utilizada consistía en situar una serie de marcas, que eran observadas periódicamente con un mínimo de dos receptores de doble frecuencia. La ocupación de cada punto de observación era de varias horas y debían planificarse con mucho cuidado las observaciones, para disponer de constelaciones

visibles que permitieran obtener la máxima precisión. El resultado final era que solo se disponía de un limitado número de observaciones coherentes.

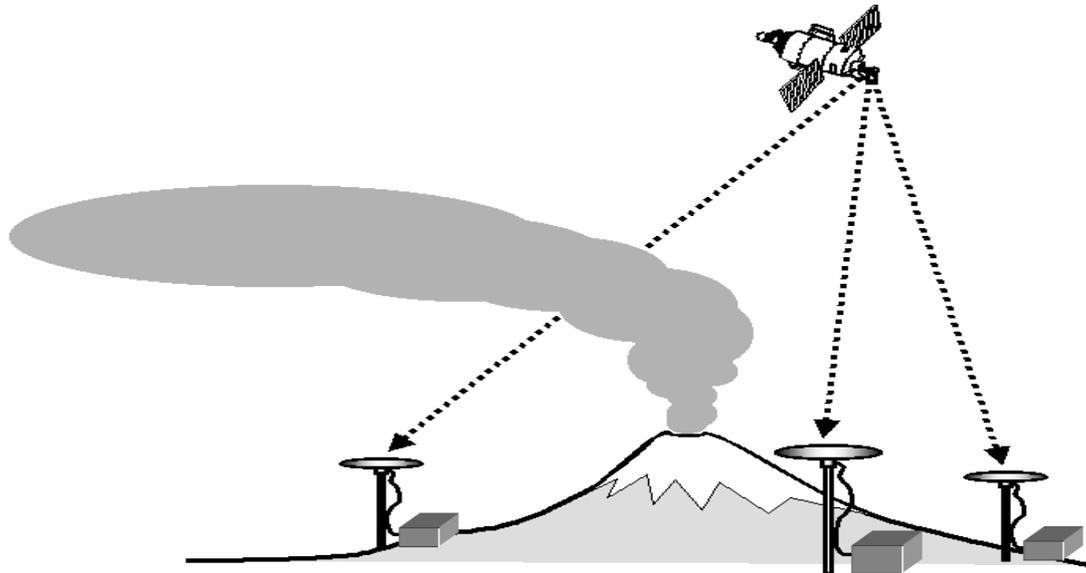
La eliminación en Mayo de 2000 de la degradación selectiva en la resolución del sistema GPS, ha supuesto una considerable mejora en la precisión de las medidas, disminuyendo el tiempo de observación requerido para cada punto. Además, y esto es lo más importante, es posible alcanzar resoluciones centimétricas con una red de receptores de una sola frecuencia (L1), siempre que estén situados en un entorno reducido, por ejemplo menos de 5 Km. Hoy son ya varios los volcanes (Kilauea, Arenal, Popocatepetl, etc.) donde existen redes GPS constituidas por receptores de bajo precio, unidos con un sistema de telemetría a una estación central donde se procesan los datos en conjunto. Se ha observado que es suficiente con transmitir un dato cada 10 segundos. Con esta periodicidad, y teniendo presente que se dispone de tiempo absoluto en cada estación es posible diseñar el sistema telemétrico de forma que se ocupe una única frecuencia y que cada estación transmita en un segundo distinto. De esta forma se simplifica la recepción de datos y en caso necesario las propias estaciones pueden trabajar como repetidoras.



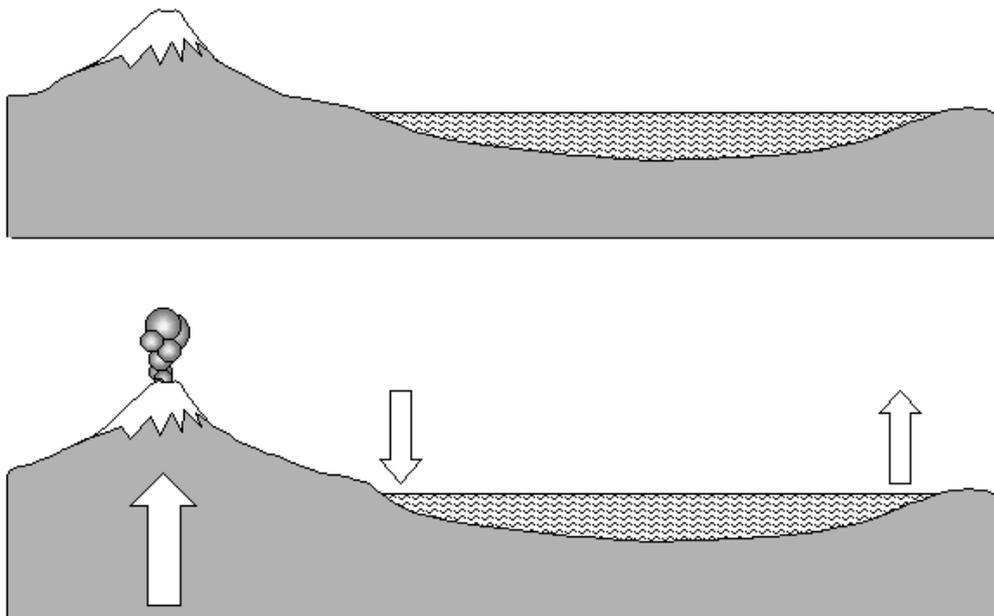
**Figura 7-6.** En el caso frecuente de tener que instalar la estación en material suelto, lo mejor es excavar un pozo de 1 m, clavar unos hierros H procurando que alcancen zonas mas compactas, y hacer un pilar de hormigón C, dejando en su interior un tubo de hierro T, sobre el que se coloca la antena A.

La alta precisión que alcanza el sistema GPS cuando opera en modo diferencial se debe a que la señal recibida en ambas estaciones atraviesa la misma estructura atmosférica. Sin embargo, esto en los volcanes puede no ser cierto, especialmente cuando se trata de un volcán con emisión continua de gases. La señal que atraviesa la pluma esta perturbada, y como la pluma puede permanecer estable durante muchas horas (días) debido a los vientos dominantes, las estaciones afectadas pueden aparecer desplazadas debido a este efecto. Es necesario contar con software específico para este tipo de aplicaciones, pues el suministrado por los fabricantes no contempla esta situación y no permite alcanzar la resolución necesaria. Igualmente interesa que sea un software que opere en tiempo real, y que se pueda disponer de los análisis con pocas horas de retraso, especialmente si se desea que estos datos sirvan para el seguimiento de una crisis. Las

estaciones en campo deben instalarse sobre pilares o anclajes que no puedan moverse por efectos locales, y esto no es sencillo en los terrenos volcánicos. Además, hay que proteger a los sistemas contra el vandalismo y las condiciones ambientales. Es conveniente disponer la antena del GPS dentro de una bóveda de plástico para evitar que el hielo pueda dañarla. Los receptores GPS para la banda L1 presentan ya un consumo muy moderado, por lo que no se requiere manejar grandes instalaciones de potencia, es suficiente con uno o dos paneles solares y una batería, similar a las utilizadas en las estaciones sísmicas.



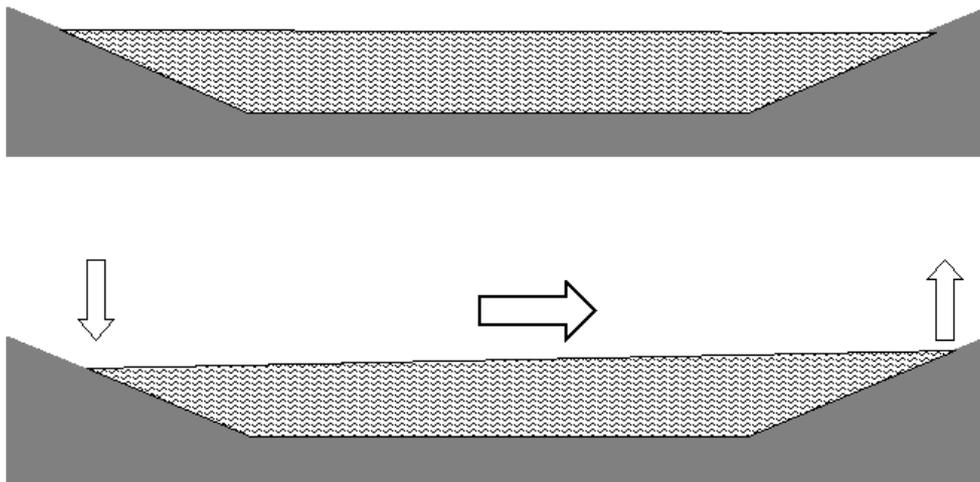
**Figura 7-7.** En volcanes con actividad persistente, la resolución del sistema GPS se ve afectada por la presencia de la pluma de gases.



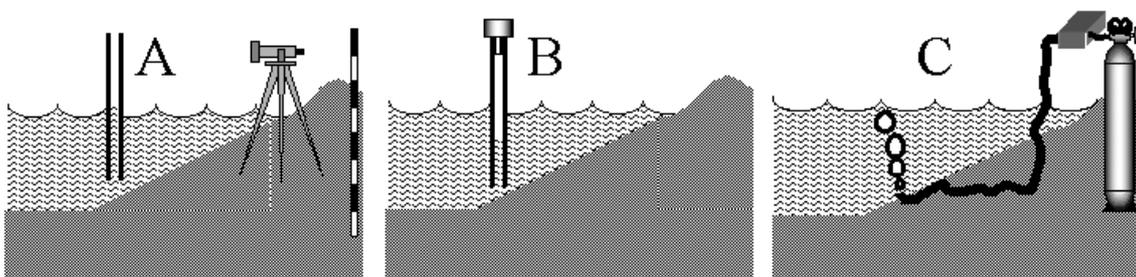
**Figura 7-8.** El proceso de deformación de un volcán se refleja con cambios en el nivel del agua de los lagos próximos. Cuando el volcán se eleva, disminuye el nivel en la costa próxima al volcán y sube en la más lejana.

## Nivelación de lagos

Muchos volcanes se encuentran en zonas de lagos, muchos de ellos formados a partir de las propias estructuras volcánicas, como son los lagos cratéricos, las calderas inundadas o los cauces de ríos cortados por coladas. Cualquier variación en la topografía del volcán tendrá su reflejo en el lago, el cual se comportará como un gigantesco nivel. Si se dispone de una serie de medidores de nivel en el lago se podrá conocer cual es la deformación del volcán. Sin embargo, los lagos suelen presentar grandes cambios en el nivel y además la superficie del lago esta sujeta a la influencia del viento, lo que exigirá introducir fuertes correcciones y disponer de sistemas de medida que combinen una gran resolución en un amplio margen de variación. Aunque es posible diseñar un dispositivo electrónico que combine estas dos condiciones, lo más habitual es utilizar métodos geodésicos tradicionales para nivelar un punto fijo en tierra con una referencia derivada del nivel medio del agua. Hoy ya están disponibles sensores de presión con una histéresis lo suficientemente pequeña para que puedan utilizarse en este tipo de medidas, aunque es conveniente dotar al dispositivo de un sistema que permita su fácil calibración.



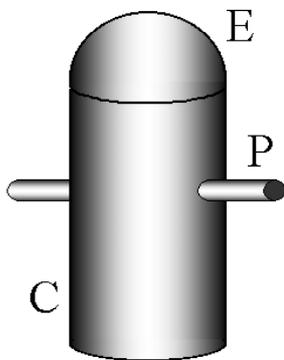
**Figura 7-9.** La nivelación del agua en un lago está muy afectada por los vientos y las corrientes. Debe tenerse esto presente cuando se trabaje con los datos.



**Figura 7-10.** Ejemplos de técnicas utilizadas para nivelar lagos: A utiliza un método convencional, empleando un tubo transparente para estabilizar el nivel del agua. B emplea un sensor de presión situado a la cabeza de un tubo cerrado. C mide la presión necesaria para hacer burbujear a flujo constante un gas (nitrógeno).

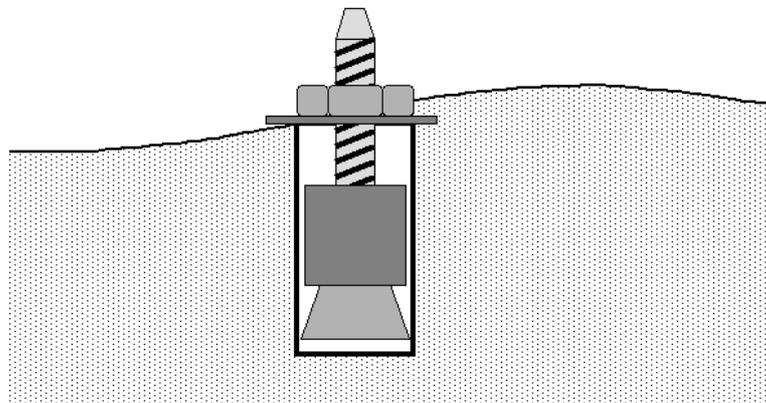
## Marcas y referencias

La aplicación de las técnicas geodésicas en volcanología requiere repetir periódicamente, a lo mejor durante muchos años, las medidas en los mismos puntos sin pérdida de precisión. Los puntos de nivelación deben marcarse adecuadamente para poder repetir las medidas cada cierto tiempo sin pérdida de precisión. Esto debe tenerse siempre presente cuando se establece un itinerario de nivelación o una red geodésica. Igualmente debe irse con cuidado con suelos inestables, como pueden ser todos aquellos que están impregnados de agua. En el mercado es posible encontrar diversos tipos de clavos para nivelación. La experiencia ha demostrado que en el tipo de habitual de suelos volcánicos recientes, dan muy buen resultado simples cilindros de acero inoxidable taladrados con un pasador, que impida la rotación o que pueda extraerse fácilmente y que se fija a un taladro realizado en la roca mediante una resina *epoxi*. Este tipo de clavos pueden fabricarse fácilmente en cualquier pequeño taller.



**Figura 7-11.** Un simple cilindro de acero inoxidable, rematado con una semiesfera en su parte superior y con un pasador para evitar la rotación se utiliza habitualmente como marca en suelos volcánico. Se fija con una resina *epoxi* a la roca.

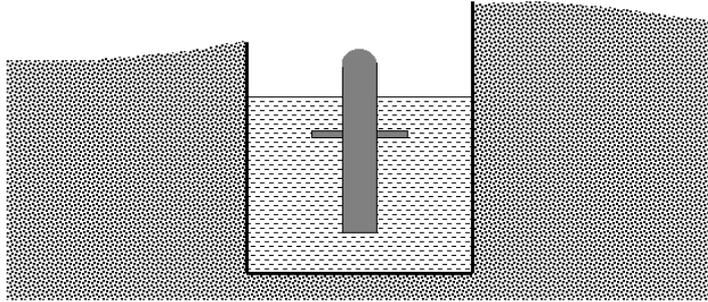
En las grandes extensiones lávicas, el problema radica en encontrar zonas donde no exista ningún movimiento de los bloques de lava. En este sentido suele ser en ocasiones mucho más problemático situar una buena referencia en lavas recientes que en depósitos piroclásticos. Además, la perforación en lavas requiere máquinas de sondeo de tipo medio, lo cual imposibilita su aplicación práctica. La única solución es buscar un buen emplazamiento, el cual deberá probarse antes de realizar obra alguna. Esto es especialmente difícil en lavas recientes de tipo aa. La única solución es excavar hasta llegar a zonas más masivas.



**Figura 7-12.** En muchos sitios pueden utilizarse tornillos de anclaje.

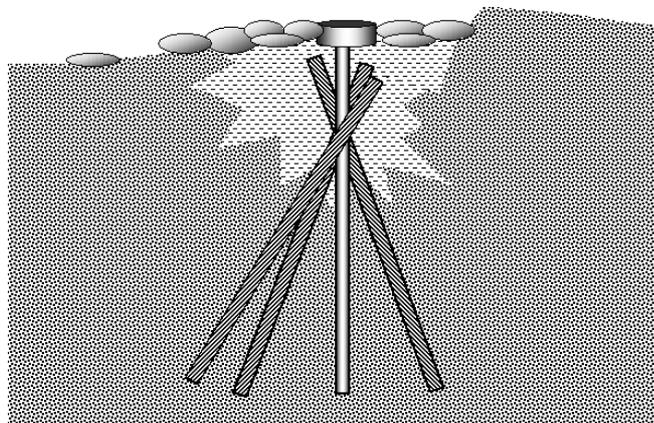
Una vez encontrada una zona estable, basta un simple taladro y fijar el clavo con una resina. Otra solución es utilizar tornillo de anclaje. Este tipo de tornillo, habitual en la construcción, funciona muy bien con materiales muy rígidos. Debe realizarse un taladro del diámetro adecuado para el tornillo que se disponga (normalmente 12 mm). Un taladro eléctrico, broca adecuada para rocas y un pequeño generador son suficientes. Al apretar la tuerca el cabezal del tornillo se expande y queda bloqueado contra la pared del taladro. Debe cubrirse todo él con un sistema de protección como puede ser un plástico y piedras. Debe quedar fácilmente identificable para poderlo localizar en el futuro y además protegido contra vándalos, lo cual no es tarea fácil.

**Figura 7-13.** En suelos cubiertos por piroclastos la mejor solución es hundir un bidón, llenarlo de cemento y en el situar el clavo.

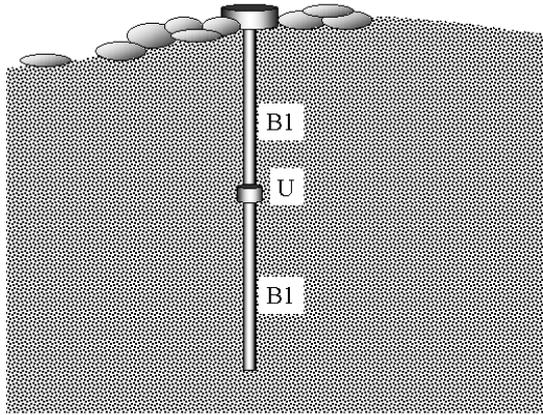


En zonas cubiertas por piroclastos, conseguir que el punto no se mueva es muy difícil, habiéndose propuesto muchas soluciones, siendo la más idónea función de las características del volcán y de los medios disponibles. La solución más fácil es enterrar un bidón de 100 ó 200 litros, llenarlo con hormigón, colocando en su interior el mismo tipo de clavo de nivelación. Es necesario vigilar que el peso de los propios observadores no sea ya suficiente para deformar el terreno en forma más o menos elástica. Este efecto es muy importante en suelos cubiertos por depósitos piroclásticos recientes. Otra solución consiste en clavar una serie de varillas del tipo utilizado en construcción que son de muy bajo precio, formando un entramado que se rellena con hormigón. Las varillas pueden clavarse a golpes o con la ayuda de un pequeño martillo percutor. El método es sencillo, económico y todo el material se puede trasladar en un pequeño vehículo. Otro método consiste en clavar una varilla vertical todo lo larga que admita el terreno, que en depósitos recientes puede ser de más de una decena de metros. Para ello se utiliza un martillo percutor o una máquina de sondeos portátil. La varilla debe introducirse hasta llegar a topar con zona dura.

**Figura 7-14.** Otra técnica es utilizar una parrilla de varillas, clavadas en el depósito piroclástico, situando sobre la central el clavo de nivelación.

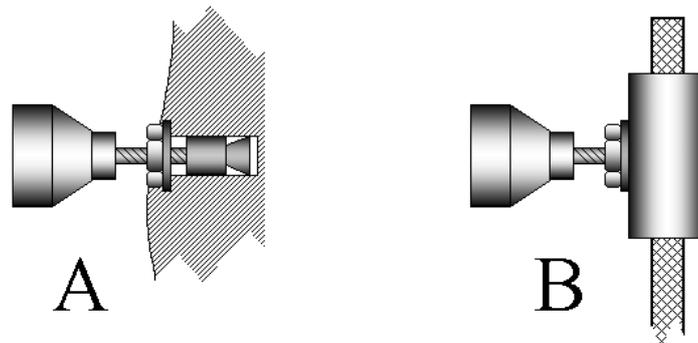


Hay que tener cuidado ya que en ocasiones se encuentra una piedra (una bomba masiva) que impide el avance mucho antes de haber llegado al final del depósito. Para facilitar la operación las varillas se empalman mediante uniones a presión, de esta forma las varillas pueden tener una longitud del orden 1.5 m pueden transportarse con facilidad en cualquier vehículo. Debajo de las piedras suele disponerse un plástico, que mejora el sistema de protección. Igualmente es importante utilizar una pintura anticorrosión.



**Figura 7-15.** También es posible utilizar una varilla de gran longitud, que puede transportarse en secciones (B1 y B2) que se unen mediante uniones U.

Cuando se diseña una red para el control de la deformación, se desea que los mismos emplazamientos puedan ser observados con distintos instrumentos, surgiendo entonces el problema añadido de la compatibilidad de los diámetros y pasos de rosca utilizados por los distintos elementos, por lo que hay que acudir a realizar multitud de adaptadores. Es importante que las roscas que se dejen en el campo estén siempre protegidas con una tuerca ciega con cabeza no estándar, de este modo es más resistente a la intemperie y a los vándalos. Todas las cabezas deberán realizarse en acero inox o bronce, para evitar su corrosión. Además deberán protegerse con grasa.

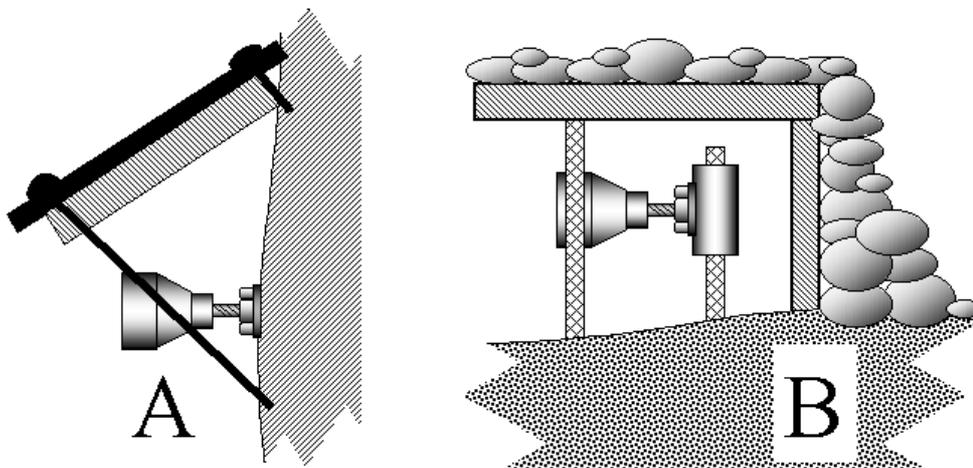


**Figura 7-16.** En (A) se muestra la fijación a la pared rocosa de un reflector mediante un tornillo de anclaje. La tuerca de bloqueo apoya directamente sobre la roca en la que hay que realizar un taladro del diámetro adecuado. En (B) se muestra la fijación de un reflector a una varilla mediante un espárrago que rosca en el reflector y en una tuerca soldada a un trozo de tubo. De esta forma al roscar el reflector se sujeta todo el dispositivo a la varilla. Todo ello debe estar protegido contra la corrosión.

Para establecer una red geodésica con la resolución necesaria para el control de una zona volcánica, la mejor solución es monumentar los vértices mediante un pilar sobre el que se puedan instalar los instrumentos sin ningún tipo de movimiento. Para ello, es necesario disponer en la parte superior del pilar un sistema de anclajes adaptado a cada

uno de los instrumentos que en él se van a instalar, como un sistema de rosca interior para soportar antenas GPS y reflectores láser y centradores para instrumentos con tres tornillos de nivelación como distanciómetros y teodolitos. Estos anclajes se realizan en acero inoxidable, cuyo coeficiente de dilatación es muy pequeño. De esta forma es posible que el error de emplazamiento sea menor de 0.1 mm. La realización de estos pilares encarece considerablemente el establecimiento de la red geodésica. Debe igualmente cuidarse que el suelo no se deforme por el peso del pilar o de los observadores. En ocasiones es necesario utilizar una tarima para evitar cargar en las inmediaciones del pilar.

Cuando la actividad volcánica aumenta no es posible instalar cada vez el sistema de prismas ni realizar medidas inversas, sino que se debe observar desde puntos situados en la periferia del volcán una serie de reflectores situados sobre el cono activo. En este caso hay que disponer muchos reflectores de bajo costo en puntos fijos. El sistema de fijación es mediante tornillos de anclaje en paredes o mediante varillas ancladas en el suelo. En muchos volcanes, la nieve es un problema grave que, además de impedir la visión de los prismas en invierno, puede destruir totalmente el material. En otros volcanes el agua, el polvo o la vegetación plantea problemas similares. En estos casos el elegir un buen emplazamiento es la mejor solución, pero además deberemos construir una protección al sistema de reflectores que no impida la visión. Lo mejor es utilizar una protección en madera, que debidamente tratada resiste bien la intemperie, es de bajo costo y fácil manipulación. A esta protección se la cubre adecuadamente con piedras, lo que le confiere mayor solidez y además sirve de camuflaje. No debe olvidarse que los dispositivos de baja altura se sepultan rápidamente por el polvo arrastrado por el viento.



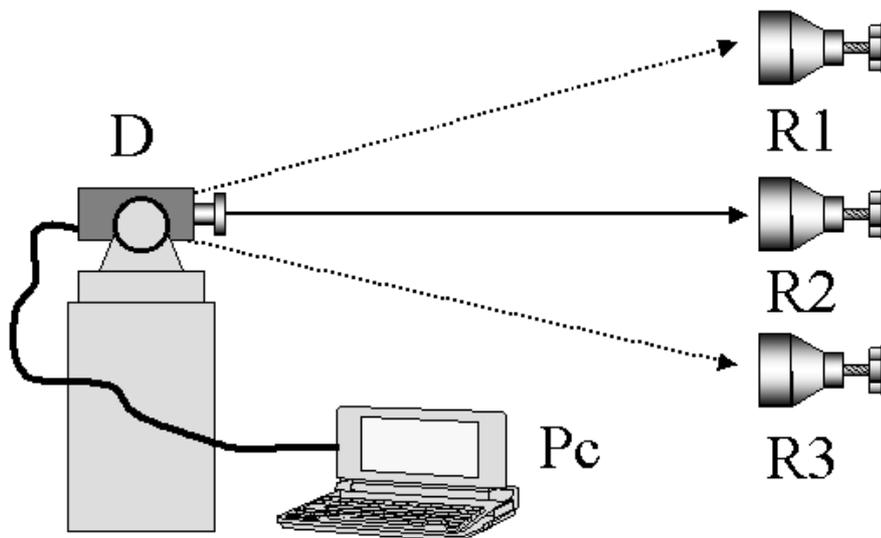
**Figura 7-17.** En A se muestra un pequeño tejado de madera que protege un reflector fijado a una pared rocosa. El tejado está reforzado por unas vigas y unos apoyos. En B se presenta un tipo de tejado utilizado para proteger el prisma que se camufla con piedras

Cuando el sistema de prismas se coloca directamente sobre una superficie horizontal, por ejemplo el borde del cráter, la protección se puede construir utilizando una caja de madera, en este caso hay que cuidar que el espejo tenga perfecta visión desde el punto de observación y que la caja no sirva de recogedor de todo el polvo y arena de la zona. Los reflectores de vidrio son rápidamente destruidos por la presencia de flúor en las emanaciones volcánicas, es por ello necesario situarlos lejos de los campos fumarolianos. En ocasiones se pueden utilizar reflectores de plástico, del tipo utilizado

en la señalización de carreteras, que son muy económicos y funcionan razonablemente bien a cortas distancias. También hay que tener presente que, las cenizas arrastradas por el viento son muy abrasivas, y en poco tiempo dejan inservibles los reflectores.

### Sistemas automáticos

La automatización de los sistemas geodésicos esta todavía lejos de ser una realidad práctica, salvo la operación de distanciómetros y por supuesto de las redes GPS. Son ya varios los volcanes en los que se ha dispuesto una red GPS que envía por telemetría los datos a una estación central, aunque la resolución del sistema GPS todavía no es suficiente y el costo muy elevado, no cabe duda de que el sistema puede ser interesante para el monitoreo de grandes aparatos volcánicos, en los que la actividad en estos momentos sea tal que se produzcan deformaciones de varios centímetros. El distanciómetro láser también es de fácil automatización, un sólo distanciómetro, con un sistema de espejos puede controlar simultáneamente varias líneas. Un simple Pc, además de servir como sistema de adquisición de datos, controla al distanciómetro y a los servomotores que mueven el espejo, ajustando cada vez la posición del espejo para obtener lecturas válidas sobre cada blanco.



**Figura 7-18.** Distanciómetro controlado por computador. Unos simples motores paso a paso permiten automatizar un sistema capaz de realizar series de medidas automáticamente.

### Medida electrónica de pequeñas deformaciones

La medida de la deformación es una de las técnicas más aplicadas en el seguimiento de la actividad volcánica. Sin embargo, las magnitudes a medir son, por lo general, muy pequeñas y se atenúan rápidamente con la distancia, especialmente en las primeras fases de reactivación del volcán o cuando el magma es muy fluido. Además, los efectos superficiales, como las variaciones de temperatura, la presencia de acuíferos y especialmente de glaciares en el edificio volcánico, provocan efectos muy superiores a los debidos a la actividad volcánica. Es necesario desarrollar técnicas que permitan medir pequeñas deformaciones, que sean fácilmente automatizables y que puedan

operar en galerías y sondeos por debajo de los estratos superficiales más susceptibles de sufrir deformaciones exógenas. La aplicación de un modelo simple de deformación, como es el modelo de Mogi y sus derivados permite estimar la magnitud de la deformación esperada en función de las características del volcán objeto de estudio. Por ejemplo se puede considerar el tamaño esperado de los nuevos conductos de emisión (obtenido a partir del estudio de los sistemas que alimentaron a erupciones anteriores), la estructura interna del volcán, el volumen de magma de la supuesta inyección, su viscosidad, etc. En general, habrá que considerar diversas hipótesis, pues es grande el desconocimiento que se tiene sobre estos temas. Como reglas elementales podemos aceptar que la deformación provocada por una fuente profunda varía con el cuadrado de la distancia a la fuente, mientras que para una fuente superficial, lo hace linealmente. Así, una variación de 1 m en el radio del conducto que alimenta un cráter activo será de sólo un milímetro a un kilómetro de distancia, y si se trata de un conducto que se está abriendo a una profundidad de un kilómetro será de 0.005  $\mu\text{m}$ . Esto nos da idea la dificultad de poder detectar las primeras fases de un intrusión mediante la medida de la deformación. El mayor problema radica que estas pequeñas deformaciones que pretendemos medir son menores que los efectos provocados por otros factores, como la temperatura, el viento, las mareas, los cambios de presión, etc. Por ello, cuando se pretende alcanzar un determinado nivel de detectabilidad, la instrumentación se complica, debiendo manejar cada vez más parámetros para poder corregir las lecturas de todos estos efectos indirectos. La primera condición es que estos instrumentos van a requerir un emplazamiento muy bien seleccionado y donde las perturbaciones sean mínimas. Después se necesitará una fuente de energía relativamente importante porque van a ser muchos los instrumentos a operar y finalmente se requiere un sistema de telemetría, adquisición y proceso de datos. En general, estos instrumentos sólo se pueden disponer en galerías subterráneas, donde la temperatura sea estable y en las que no circule agua en sus proximidades. Una solución alternativa es la utilización de cuevas, túneles lávicos, sondeos o incluso el sótano de algunos edificios. Existe una gran variedad de instrumentos para la medida de pequeñas deformaciones pero que, en realidad, se pueden reducir a dos tipos fundamentales: extensómetros y clinómetros, a los que debemos añadir los instrumentos de medida indirecta de la deformación, como son los gravímetros y mareógrafos.

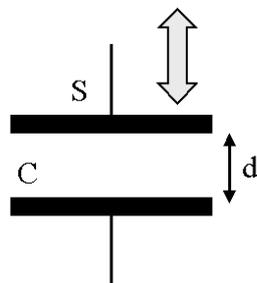
<i>Instrumentos para la medida de pequeñas deformaciones</i>		
<i>Familia</i>		<i>Objetivo</i>
Extensómetro		Medida de distancias entre dos puntos
Clinómetro	Nivel	Inclinación en larga base
	Péndulo	Inclinación puntual
Indirectos	Mareógrafo	Variación de nivel del mar o lago
	Gravímetro	Variación de la gravedad

Todos ellos, gracias a los dispositivos electrónicos de que van dotados, pueden alcanzar una resolución muy elevada, pero que en la práctica está limitada por las perturbaciones de otros parámetros sobre el instrumento y lo que es más difícil de conocer, sobre el propio medio en el que está instalado. La investigación sobre el modelado de estos

efectos indirectos es hoy el caballo de batalla para que estos instrumentos sean de utilidad práctica en la vigilancia de volcanes. La base de todos estos instrumentos la constituye el sensor electrónico de desplazamiento, de estos hay múltiples tipos, aunque se pueden reducir a unas pocas familias. La siguiente tabla recoge los tipos más utilizados

<i>Sensores de desplazamiento</i>			
<i>Familia</i>		<i>Montaje</i>	<i>Medida</i>
Capacitivo	Simple	Oscilador	Frecuencia
	Diferencial	Montaje en puente	Tensión
Inductivo	Inductancia	Oscilador	Frecuencia
	Diferencial	Transformador diferencial	Tensión
	Reluctancia	Perdidas circuito oscilante	Tensión
Magnético	Núcleo saturado	Transformador diferencial	Tensión
	Magnetorresistencia	Montaje en puente	Tensión
	Efecto Hall	Elemento Hall	Tensión
Ópticos	Fotodiodos	Montaje diferencial	Tensión

Algunos de estos captadores son de uso industrial y por ello es fácil conseguir en los catálogos elementos que se adapten a nuestras necesidades. En otros casos es necesario construirlos bien porque no existan en el mercado o por no adaptarse a nuestras necesidades o posibilidades. Los captadores que ya dan una salida en frecuencia o duración de pulso son directamente compatibles con los sistemas digitales de adquisición de datos y permiten obtener fácilmente resoluciones por encima de los 16 bits. Por el contrario, los sensores que proporcionan una tensión deberán conectarse a un conversor tensión frecuencia o a un conversor analógico digital antes de poder entrar en el sistema de adquisición de datos. Hay que cuidar que esta interfase analógica digital no haga perder resolución al sistema. Los conversores actuales de alta resolución (más de 16 bits) permiten diseñar fácilmente estas interfases.



**Figura 7-19.** Condensador plano formado por dos placas planas, paralelas, separadas una distancia  $d$ . Al variar separación de las placas varía la capacidad.

### Sensores capacitivos

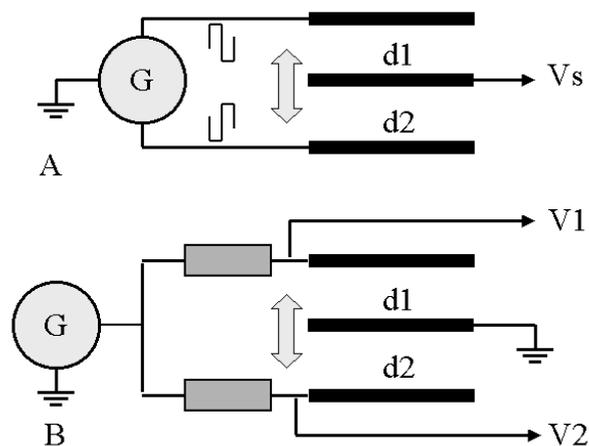
De todos los captadores de desplazamiento, el captador capacitivo es el más sencillo y económico y se puede construir sin demasiados problemas. Además constituye una buena experiencia de tipo didáctico para familiarizarse en la medida de pequeños desplazamientos. En función de las características mecánicas del instrumento se elige el

circuito de medida. El principio de funcionamiento de un captador capacitivo es disponer dos placas metálicas próximas de forma que una de ellas pueda desplazarse con respecto a la otra, constituyendo un pequeño condensador variable. La capacidad de un condensador formado por dos placas planas, paralelas, de superficie  $S$ , separadas una distancia  $d$  viene dada por

$$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

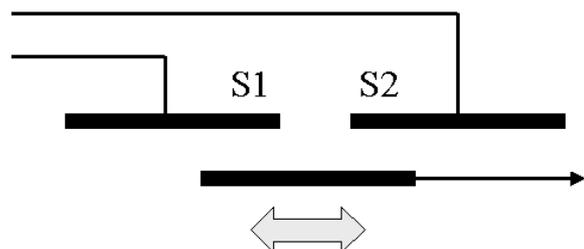
donde  $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica del vacío ( $8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N.m}^2$ ) y  $\epsilon$  la constante dieléctrica del medio (1 prácticamente para el aire). Si este condensador forma parte de un circuito oscilante, la frecuencia producida será función de la capacidad y por consiguiente de la distancia que separa las placas. Es importante tener presente que la capacidad de un sensor, formado por dos placas de pocos centímetros de superficie, separadas dos o tres milímetros, es muy pequeña (del orden de unos pocos picofaradios) por lo que hay que adoptar precauciones como es utilizar conexiones muy cortas.

**Figura 7-20.** La utilización de sistemas diferenciales permite una mejor compensación de las variaciones de temperatura o de la humedad. Sin embargo, plantea mayores complicaciones de índole mecánica. A) muestra el condensador diferencial clásico, con placa intermedia móvil y aislada de masa. B) corresponde a un montaje en puente con placa intermedia a masa.

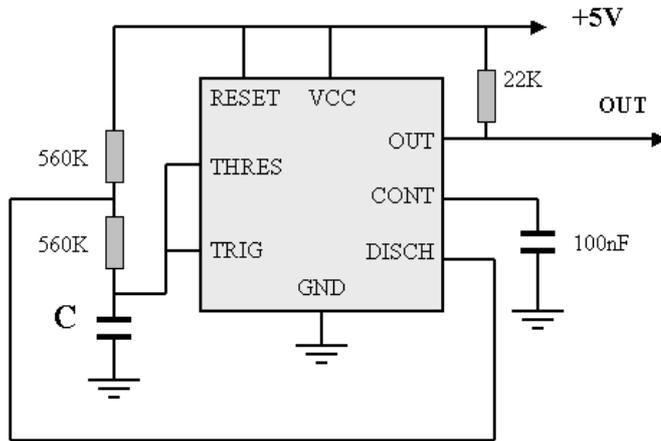


En algunos casos se puede realizar un montaje diferencia, que si bien complica la mecánica permite obtener mejor linealidad y resolución, siendo especialmente menos sensible a las variaciones de temperatura. Cuando los desplazamientos a medir son superiores a un centímetro, el captador capacitivo se construye de forma que las placas se desplacen manteniéndose fija la distancia entre ellas y variando la superficie enfrentada. Generalmente se adopta siempre una estructura diferencial para este tipo de realizaciones. En estos casos deberá cuidarse extraordinariamente la mecánica, de forma que se conserve siempre el paralelismo entre las placas, tratando de reducir las holguras al máximo. Sin embargo, cuando los desplazamientos esperados son demasiado grandes es preferible utilizar un transformador diferencial. Este tipo de montaje también puede realizarse con la placa móvil aislada o conectada a masa.

**Figura 7-21.** Montaje de un medidor de desplazamientos superiores al centímetro, utilizando un puente capacitivo.



La electrónica asociada a estos montajes es simplemente un circuito que permita medir con precisión la capacidad de un condensador o bien comparar la capacidad de dos condensadores. Aquí presentaremos una serie de circuitos muy sencillos realizados con componentes de muy fácil adquisición y que, sin embargo, dan unos resultados extraordinariamente satisfactorios, especialmente cuando trabajan en un ambiente de temperatura constante.



**Figura 7-22.** Utilización de un oscilador para la medida de una capacidad. Este montaje utiliza un circuito 555 y a pesar de su sencillez presenta unas excelentes cualidades. Dada la pequeña magnitud de la capacidad que presenta el sensor es conveniente utilizar la versión CMOS 7555. Los montajes diferenciales requieren la utilización de dos osciladores. Es conveniente utilizar la versión que incluye dos osciladores en el mismo chip para cancelar al máximo los efectos de la temperatura.

La primera realización se basa en el popular 555, circuito temporizador de precisión muy versátil y del que utilizaremos su versión en CMOS como el 7555 y similares. El circuito corresponde al montaje estándar del 555 como oscilador. La frecuencia de oscilación está definida por las resistencias  $R_a$  y  $R_b$  y el condensador  $C$ , que en nuestro caso corresponde al sensor capacitivo. La frecuencia de salida del circuito viene dada aproximadamente por

$$f_{osc} = \frac{1.44}{(R_2 + 2 R_3) C_1}$$

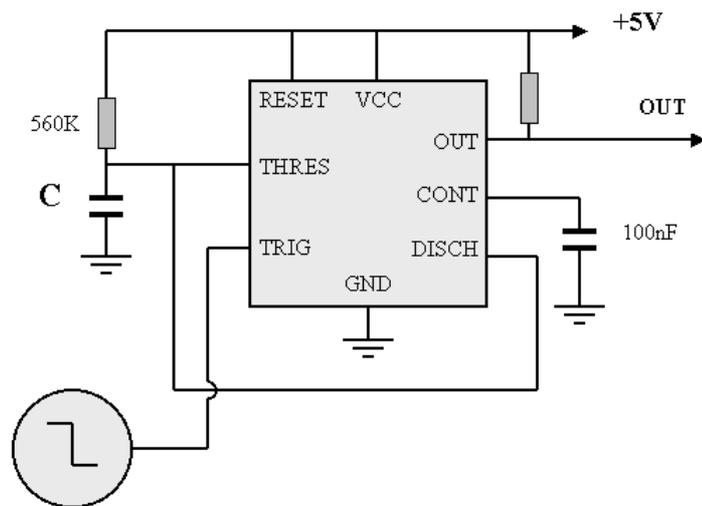
El factor de forma de la onda cuadrada de salida viene dado aproximadamente por

$$\frac{t_L}{t_H} = \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

El punto importante del diseño es la capacidad que presenta el captador: esta es siempre muy pequeña, pensemos que un condensador de placas cuadradas de 20cm de lado, separadas 2 mm presenta una capacidad de sólo 177 pF. Como el límite de la frecuencia de oscilación del 7555 está sobre los 500 KHz, deberemos elegir las resistencias que intervienen en la gama de 100 K $\Omega$  para  $R_a$  y del orden de 50 K $\Omega$  para  $R_b$ . De esta forma obtenemos una frecuencia de salida del orden de 40 KHz. Si los cables de conexión son largos es conveniente intercalar un divisor, de forma que la frecuencia a transmitir sea más baja y de esta forma no se planteen problemas en el acoplamiento a la línea. El equipo de medida es un simple frecuencímetro o un contador conectado directamente al sistema de adquisición de datos o telemetría. Se procurará trabajar a una tensión lo más elevada posible compatible con el diseño del 7555 para disminuir al máximo el ruido inducido por interferencias electromagnéticas procedentes de otros

equipo. Al ser el 7555 de tecnología CMOS, puede funcionar perfectamente a 15V, aunque por razones prácticas se le hace operar generalmente a 12V. Hay que diseñar con cuidado el sistema de soporte de las placas sensoras y el blindaje del captador, pues fácilmente puede ocurrir que las capacidades parásitas a masa sean mayores que la capacidad del sensor. Hay que tener una especial precaución con los cables que unen el captador con el 7555, teniendo en cuenta que la placa activa tiene que poderse mover libremente. Por supuesto la alimentación estará perfectamente estabilizada y se incluirán condensadores de desacoplo en todos los circuitos. Al funcionar a frecuencias relativamente elevadas debe evitarse, sobre todo, el posible acoplamiento entre la línea de salida y el captador, para ello se encerrará la electrónica dentro de un pequeño blindaje, sacando la señal mediante un conector para radiofrecuencia y se utilizará un cable coaxial.

**Figura 7-23.** Medida de la capacidad mediante la técnica de la duración de pulso. Un generador de impulsos (V2) dispara periódicamente el monoestable realizado con un circuito 555. la duración del pulso de salida es proporcional a C1.



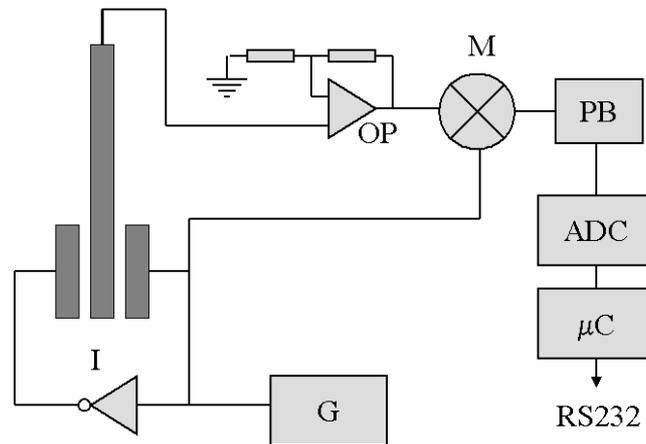
Otro montaje, que permite una fácil conversión de la salida de pulsos a tensión, utiliza también el 7555, pero ahora como circuito monoestable. Un oscilador controlado por cuarzo o un segundo 7555 genera la señal de reloj. La capacidad del sensor es ahora proporcional a la duración del pulso

$$t = 1.1 R C$$

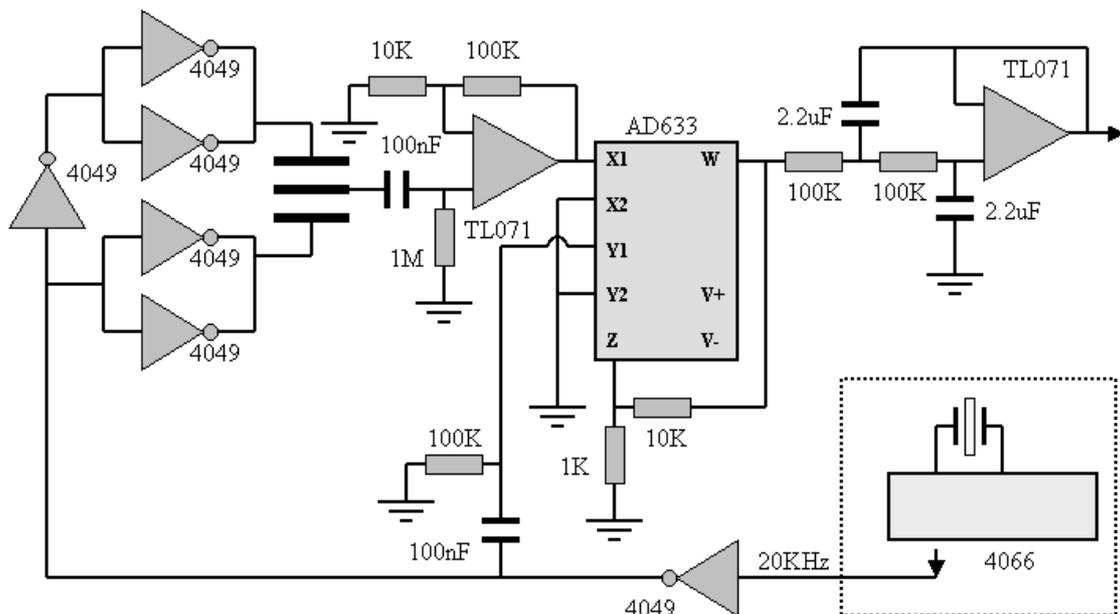
La frecuencia de repetición de los pulsos viene determinada por las resistencias R1 y R2 del primer 7555, montado como oscilador. Es conveniente que la separación entre pulsos sea entre 5 y 10 veces la duración del pulso. Un simple integrador permite convertir fácilmente esta señal en una señal analógica, la constante de tiempo del integrador debe ser varios órdenes de magnitud mayor que la correspondiente a los pulsos.

Los montajes en puente poseen una sensibilidad muy superior, pero a su vez son montajes más delicados y complejos, especialmente en su parte mecánica cuando la placa activa debe estar aislada de masa. Otra ventaja del montaje en puente es que puede operar satisfactoriamente con capacidades mucho menores que los montajes de condensador único. Un montaje en puente con la placa central activa, consta de una excitación simétrica de las dos ramas del puente, un amplificador con muy alta impedancia de entrada y un multiplicador. A la salida hay que disponer de un elemento de filtro para eliminar los restos de la señal de excitación.

El elemento clave en estos circuitos es el multiplicador, pues de su perfecto ajuste depende la calidad de todo el montaje. Aunque es posible diseñar un multiplicador con elementos discretos, hemos preferido utilizar el AD633 (*Analog Devices*) que, a pesar de ser de precio moderado, posee unas excelentes prestaciones. Este circuito posee dos entradas diferenciales X1, X2 y Y1, Y2, la entrada X se utiliza para la señal procedente del puente amplificada ligeramente por el amplificador IC2 cuya función principal es adaptar la alta impedancia del sensor a la requerida por el multiplicador.



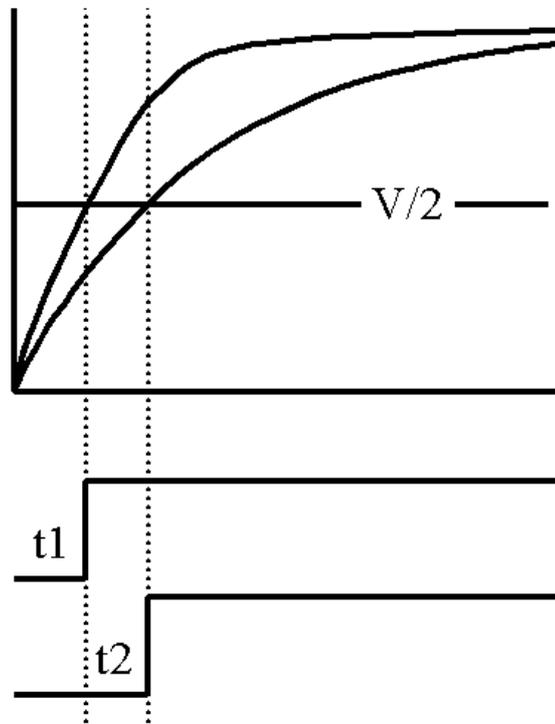
**Figura 7-24.** Montaje convencional para la utilización de un sensor de desplazamiento basado en un montaje capacitivo diferencial. Se utiliza un generador G de media frecuencia (10-100 KHz) que alimenta las placas fijas mediante señales invertidas (I). La señal de la armadura móvil se lleva a un amplificador (OP) y a un detector de fases (M). A la salida se dispone un filtro pasa bajos (PB), el conversor analógico digital (ADC) y el microcontrolador ( $\mu C$ ).



**Figura 7-25.** Circuito para un sensor capacitivo diferencial. Se utiliza un multiplicador analógico AD633. La excitación (aproximadamente 20 KHz se obtiene a partir de un oscilador de cuarzo con un divisor binario como el 4066. El filtro RC situado en la entrada Y del multiplicador permite utilizar sólo alimentación positiva en la excitación del puente (4049).

La señal de referencia se aplica directamente a la entrada Y del multiplicador. A la salida obtenemos directamente el producto de ambas señales, que es proporcional (con signo) a la posición relativa de la placa móvil con respecto a las placas fijas. El circuito de excitación está formado por dos pares de inversores 4049, utilizándose otro 4049 para obtener la señal inversa y el inversor restante simplemente como adaptador de entrada. Se ha adoptado esta configuración para conseguir que ambas ramas sean excitadas del mismo modo, evitando que la carga capacitiva debida a los cables de conexión y al propio sensor desequilibre una rama con respecto a la otra. Es importante que la señal de reloj sea perfectamente simétrica, por ello es conveniente obtener esta señal mediante un oscilador y un divisor binario. La frecuencia de operación del sistema es del orden de los KHz, dependiendo fundamentalmente de la parte mecánica y la mejor solución es determinarla mediante ensayos. El circuito requiere una alimentación simétrica, que normalmente es de +8 y -8V. Los inversores 4049 deben alimentarse entre +V y -V para conseguir que la excitación sea simétrica con respecto a masa. Igualmente, la señal de referencia de AD633 debe ser simétrica respecto a masa.

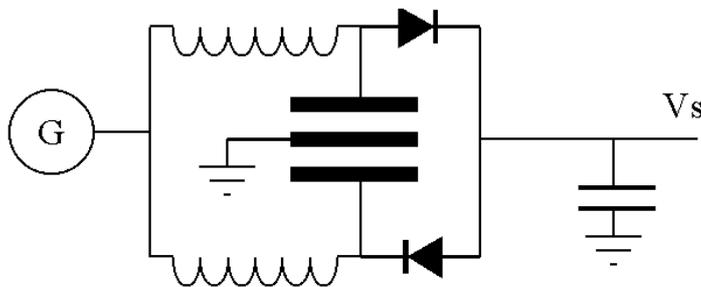
**Figura 7-26.** Los dos condensadores se cargan a partir de un mismo pulso y mediante dos comparadores rápidos se determina en que momento la carga del condensador supera la mitad de la amplitud del pulso de carga ( $V/2$ ). Un sencillo circuito digital o un integrador diferencial permiten obtener el valor de la diferencia de capacidades en digital o analógico.



Los circuitos correspondientes a montajes con placa central a tierra son todavía más complejos, especialmente porque se trata de medir la diferencia de capacidad entre dos condensadores muy pequeños. Una solución es cargar simultáneamente los dos condensadores que constituyen las dos ramas del puente a través de dos resistencias idénticas y medir la diferencia de tiempo de carga que exista entre ellas. Para ello se comparan las tensiones en cada condensador con un nivel de referencia, del orden de  $V/2$ , mediante dos comparadores rápidos.

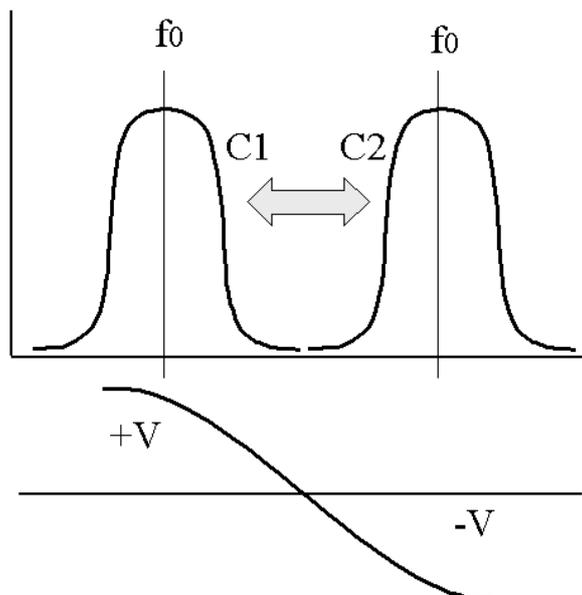
El circuito requiere una señal de reloj, que se puede obtener mediante un oscilador de cuarzo. La separación entre pulsos debe ser mayor que la constante de tiempo del sensor (RC). El sistema necesita 12V para el detector propiamente dicho y +12, -12V para el amplificador diferencial y el integrador de salida. Al superar la tensión de los condensadores el nivel de referencia cada comparador conmuta y mediante una serie de

puertas lógicas obtenemos un pulso de duración la diferencia de tiempos de carga de ambos condensadores. Para conocer la polaridad la salida de cada rama se hace independientemente. Un amplificador diferencial suma ambas y a su salida tenemos una señal de igual duración y signo según sea la rama que antes haya superado el nivel de referencia. Un integrador convierte los pulsos de duración variable en una señal de corriente continua. Esta realización es muy crítica en cuanto trabaja con señales muy rápidas. Deben seleccionarse los componentes con cuidado, para que puedan funcionar a frecuencias de varios MHz y minimizar todas las capacidades parásitas.



**Figura 7-27.** Circuito utilizado para la medida de montajes diferenciales con valores muy bajos de capacidad. Los dos circuitos LC están sintonizados ligeramente por encima de la frecuencia de la excitación.

Otra realización para sensores de capacidad diferencial con placa central a masa se basa en el incluir dos bobinas, de forma que el conjunto constituya un circuito resonante LC. Hay que sintonizar las inductancias de forma que cuando el sensor está centrado estén sintonizadas por encima de la frecuencia de excitación. De esta forma, al desplazarse la placa móvil, aumenta la señal en la rama a la que el sensor se aleja, disminuyendo en la contraria. Los dos diodos y el condensador de salida convierten la señal de sintonía en una señal de corriente continua proporcional a la posición del captor. En lugar del detector tradicional que utiliza dos diodos, se puede emplear un multiplicador del tipo AD630 o AD633, mejorando la linealidad del conjunto.

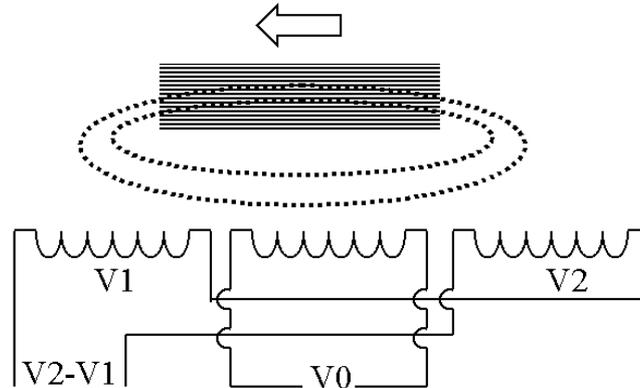


**Figura 7-28.** La variación de la posición de la armadura móvil (unida a masa) provoca la mejora de la sintonía de una rama y la desintonía de la otra.

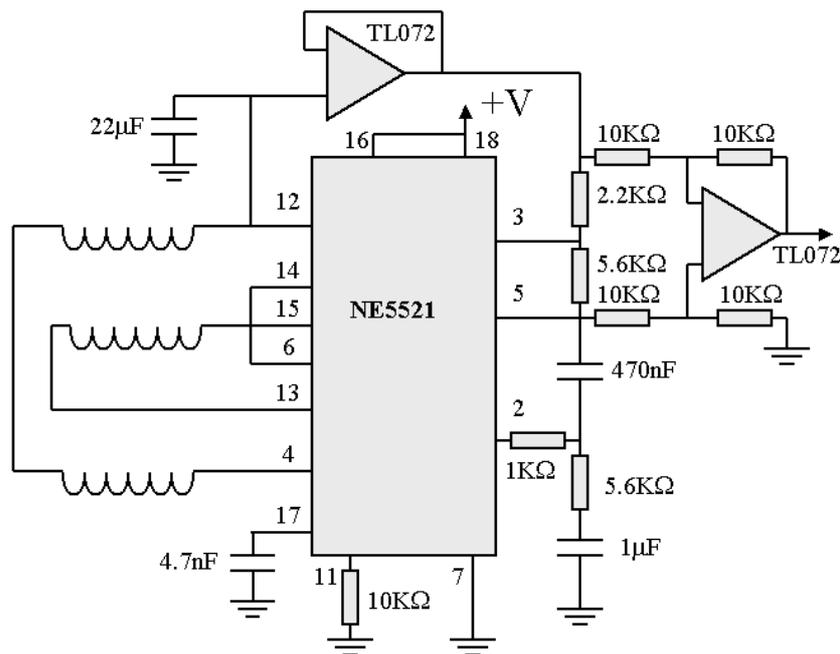
### Sensores de transformador diferencial

Los captadores de desplazamiento del tipo transformador diferencial son ampliamente utilizados en la industria, además requieren una cuidadosa realización mecánica, por lo que es preferible adquirirlos, teniendo en cuenta que son también elementos de bajo

costo. El principio de funcionamiento es el siguiente: sobre un tubo se disponen dos arrollamientos secundarios iguales (S1 y S2) y entre ambos un arrollamiento primario (P). Los dos secundarios se conectan en oposición, por lo que en ausencia de núcleo la salida que se obtiene es nula. Si se introduce un núcleo (N), a la salida se obtiene una señal proporcional a la diferencia de longitudes de las bobinas afectadas por la presencia del núcleo y cuya fase corresponde al secundario predominante.



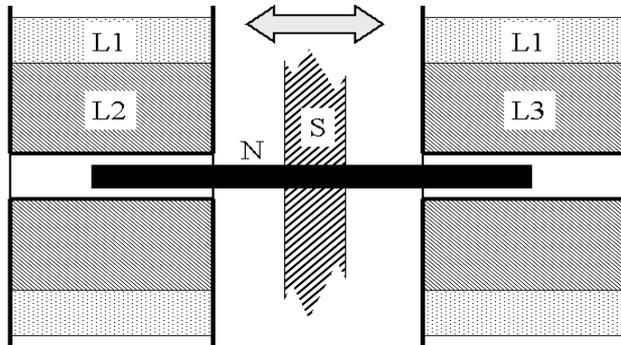
**Figura 7-29.** El transformador diferencial está constituido por dos bobinas iguales conectadas en serie y en oposición, que son excitadas por otra bobina dispuesta simétricamente con las dos primeras. Un núcleo ferromagnético se desplaza haciendo variar el acoplamiento magnético en forma diferencial.



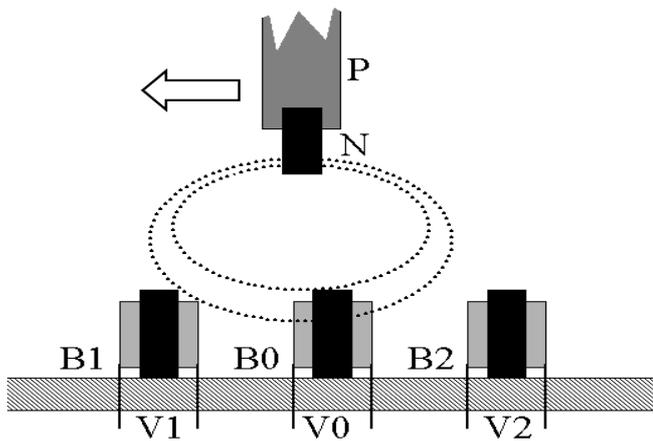
**Figura 7-30.** Utilización de un NE5521 para un sensor de desplazamiento de tipo transformador diferencial. El NE5521 incluye el oscilador, el detector de fase y la tensión de referencia. Se le ha añadido un amplificador diferencial para adaptarlo a un convertidor analógico diferencial con entrada bipolar.

La electrónica necesaria es simplemente un oscilador para excitar el captador y un multiplicador para obtener la señal de salida. Un AD630 o AD633 sirven perfectamente para ello. Es posible encontrar circuitos integrados específicos para este tipo de captadores como el NE5521 que incluyen también el oscilador de excitación y el filtro de salida. Los mismos distribuidores de estos captadores que son de uso muy frecuente suministran la electrónica optimizada para cada tipo de sensor. Es posible encontrar

captadores de este tipo para un amplio margen de longitudes a medir, resoluciones y con distinto acabado mecánico, según se desee que trabaje el núcleo móvil. Sin embargo, los modelos industriales suelen presentar una elevada resistencia mecánica al movimiento, por lo se deberán elegir modelos en los que la pieza móvil se mueva libremente, sin centradores ni resortes de recuperación

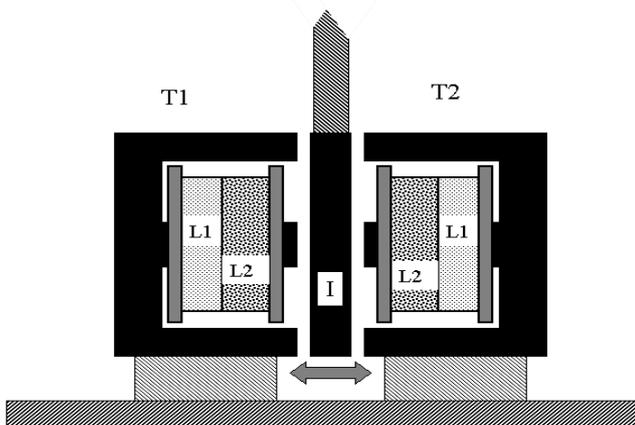


**Figura 7-31.** Una realización práctica muy simple consiste en construir dos devanados iguales, incluyendo cada uno de ellos una bobina secundaria L2 y la mitad de la bobina primaria L1. El núcleo móvil se sitúa en el centro



**Figura 7-32.** Un montaje óptimo para la medida de pequeñas deformaciones consiste en disponer los tres arrollamientos linealmente, situando un núcleo ferromagnético pocos milímetros por encima. Al varía la posición del núcleo varía el circuito magnético correspondiente obteniéndose una señal proporcional a la asimetría del sistema.

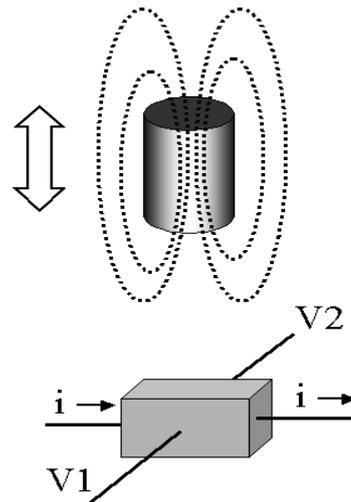
Para la medida de pequeñas deformaciones, los montajes coaxiales plantean muchos problemas mecánicos, ya que es muy difícil centrar las piezas sin que aparezcan puntos de fricción. Para estas aplicaciones es preferible disponer las bobinas linealmente, situando el núcleo móvil enfrente, a pocos milímetros. El montaje se realiza fácilmente utilizando choques de 220  $\mu$ H. Existen también realizaciones comerciales. Otra posibilidad es utilizar dos pequeños transformadores con núcleo de ferrita en E



**Figura 7-33.** Detector de desplazamiento construido mediante dos transformadores T1 y T2 dotados con núcleo en E. El cierre del circuito magnético I se une al mecanismo móvil. Los dos primarios van conectados en fase y los secundarios en oposición.

## Sensores de efecto Hall

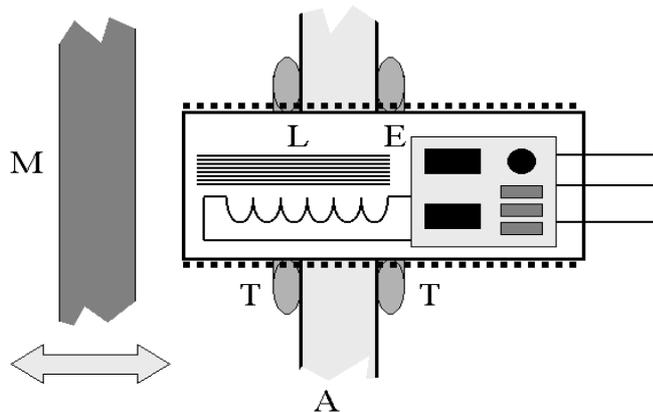
Un sensor de efecto Hall es un semiconductor por el que se le hace pasar una corriente  $i$ , obteniéndose una tensión  $V1-V2$  proporcional al flujo magnético que lo atraviesa. Estos sensores se encuentran actualmente disponibles en múltiples configuraciones ya que se utilizan ampliamente como sensores de posición o como interruptores de proximidad. Muchos de ellos llevan ya incorporada toda la electrónica necesaria para su operación, pudiéndose conectar directamente a la entrada del conversor analógico digital.



**Figura 7-34.** Un sensor de efecto Hall es un semiconductor por el que se le hace pasar una corriente  $i$ , obteniéndose una tensión  $V1-V2$  proporcional al flujo magnético que lo atraviesa. Es importante prestar atención al circuito magnético del imán que se utiliza para polarizar el sensor de efecto Hall, pues de esto depende la linealidad del sistema.

Para las aplicaciones de medida de pequeñas deformaciones, hay que elegir sistemas que presenten una buena linealidad y un bajo coeficiente de temperatura y escaso ruido de baja frecuencia. Son robustos y no les afecta la humedad. Sin embargo su cifra de ruido es muy elevada.

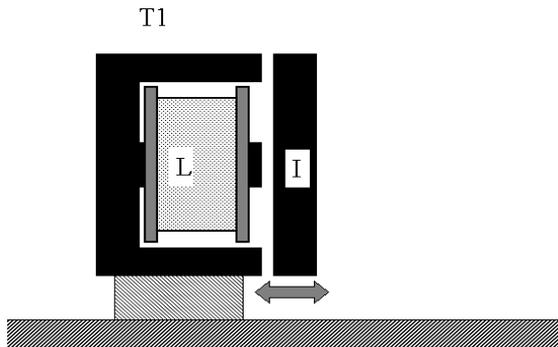
**Figura 7-35.** Sensor de reluctancia: se trata de un oscilador LC, al acercarse un cuerpo metálico  $M$  se inducen pérdidas en el circuito oscilante, que provoca una disminución de la frecuencia de oscilación. L bobina, E electrónica, T tuercas de fijación y ajuste, A soporte.



## Sensores de reluctancia magnética

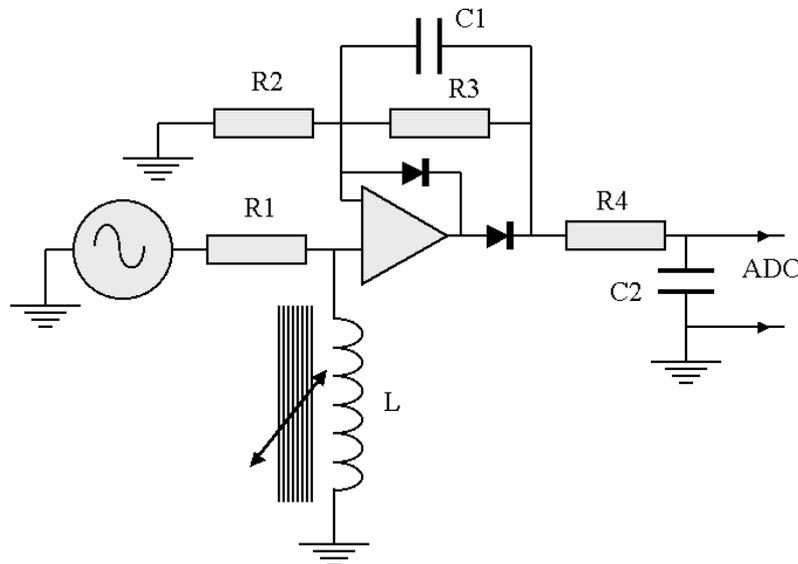
Los captadores de desplazamiento de tipo reluctancia variable son comunes como detectores de proximidad en la industria. En estos casos hay que elegir un tipo que posea salida analógica o que lleve la electrónica asociada al exterior del captador, pues de otro modo sólo poseen salida del tipo todo o nada, y no son aplicables en nuestro caso. En este tipo de sensores se encuentran los que presentan una mayor sensibilidad pero son los que menor margen de operación presentan. El dispositivo de la figura corresponde a un captador basado en el bloqueo de un oscilador de tipo LC cuando se le

aproxima una lámina metálica a la bobina. Las corrientes inducidas en la lámina provocan una disminución de Q, que llega a bloquear la oscilación.



**Figura 7-36.** Un montaje sencillo consiste en utilizar una autoinducción con núcleo de ferrita en E. El cierre del núcleo se fija a la parte móvil del dispositivo.

El margen de operación es de sólo unas fracciones de milímetro. En general, todo el dispositivo se encuentra encerrado en un tubo roscado que se ajusta al soporte en la posición correcta mediante un juego de tuercas.

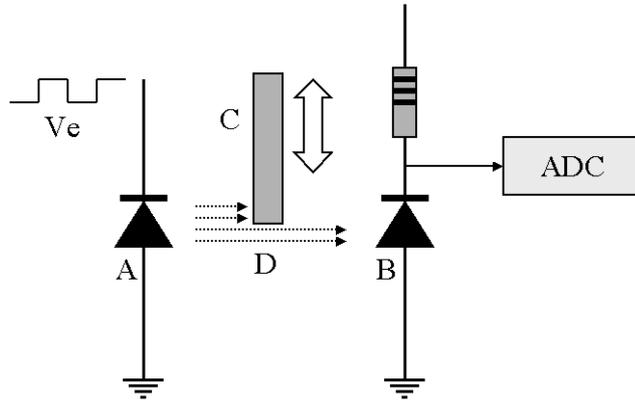


**Figura 7-37.** La figura muestra un circuito sencillo para este tipo de sensores que utiliza un oscilador senoidal que alimenta la autoinducción a través de una resistencia R1. Un amplificador operacional montado como rectificador de media onda es suficiente para proporcionar una señal adecuada para el convertor analógico digital. R2 y R3 determinan la amplificación del dispositivo. C1 y C2 deben elegirse lo suficientemente grandes para eliminar la señal de excitación. R1 debe elegirse de forma que no aparezcan saturaciones en el circuito rectificador.

### Sensores ópticos

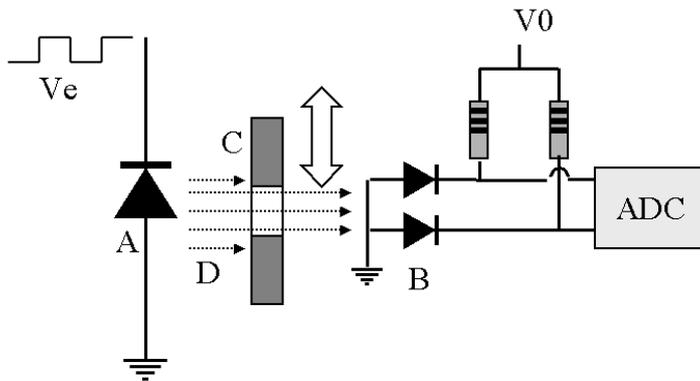
Estos sensores presentan una buena linealidad, son de muy bajo coste y fácilmente realizables. Ahora bien, son muy sensibles a los efectos de la humedad. Se trata de situar un fotodiodo y un diodo emisor (ambos con el pico de sensibilidad correspondiente a la misma longitud de onda) y situar el elemento móvil de forma que interrumpa parcialmente el haz luminoso. Es posible realizar montajes diferenciales utilizando fotodiodos ya diseñados específicamente para esta aplicación. De esta forma se pueden compensar bastante bien los problemas de deriva térmica o el envejecimiento del sistema.

**Figura 7-38.** Sensor óptico de pequeños desplazamientos que utiliza un diodo emisor A y un fotodiodo B. El objeto móvil C interrumpe parcialmente el haz luminoso que incide sobre B. La salida se envía directamente al conversor analógico diferencial. El diodo emisor se excita con una señal periódica para poder compensar la corriente de oscuridad.



La electrónica asociada es muy sencilla, pues basta con disponer un amplificador diferencial y tomar precauciones frente a posibles saturaciones. En general, el dispositivo trabaja en modo pulso, de esta forma es posible corregir la corriente de oscuridad.

**Figura 7-39.** sensor óptico de pequeños desplazamientos que utiliza un diodo emisor A y un fotodiodo diferencial B. El objeto móvil va provisto de un orificio de forma que el haz luminoso esté centrado entre los dos sectores sensibles del fotodiodo. Al desplazarse se desequilibran y se obtiene una señal proporcional al desplazamiento.



Es posible diseñar otros sensores utilizando dispositivos láser, sin embargo, la necesidad de que estén operativos durante mucho tiempo sin interrupciones limita su aplicación en este ámbito.

## Péndulo

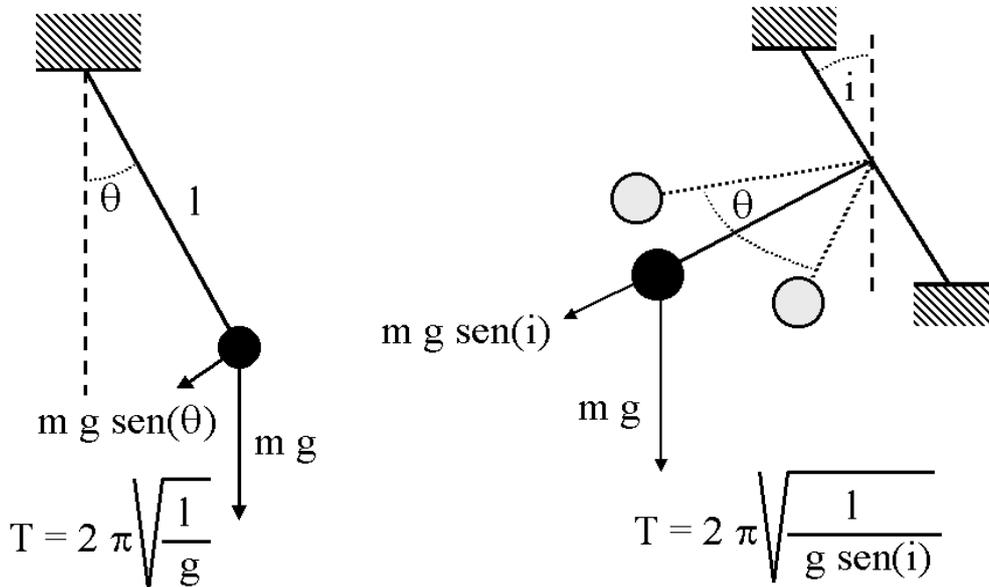
El péndulo es el dispositivo más sencillo para la medida de inclinaciones. La sensibilidad del sistema es proporcional a su longitud o lo que es lo mismo a su periodo. Para un péndulo ideal el periodo es

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

para alcanzar periodos grandes es necesario aumentar mucho la longitud del péndulo. Una solución es utilizar un péndulo cuyo eje de rotación esté inclinado. En este caso el periodo viene dado por

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g \sin(i)}}$$

para valores muy pequeños de  $i$  (plano de oscilación del péndulo casi horizontal) el periodo puede alcanzar valores muy grandes. Sin embargo, este dispositivo es muy sensible a las variaciones de las condiciones mecánicas y especialmente a la inclinación. Es por ello que el dispositivo debe calibrarse una vez instalado, lo cual no es tarea fácil.

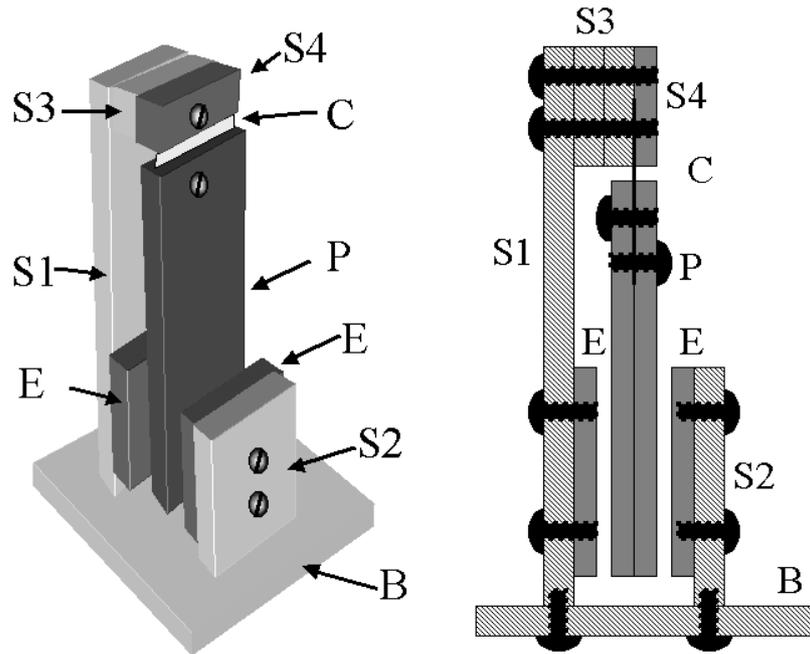


**Figura 7-40.** Péndulo vertical y péndulo horizontal. Al inclinar el eje de rotación aumenta el periodo del péndulo.

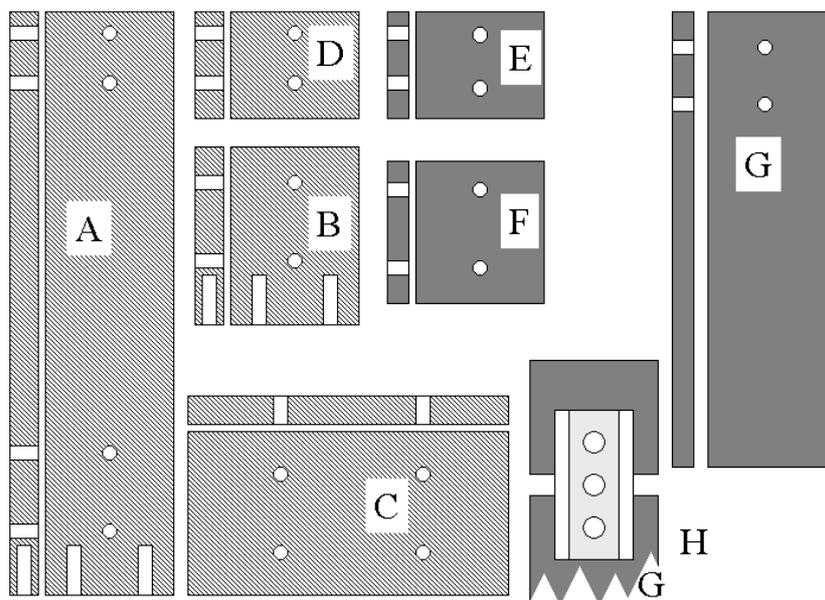
La utilización práctica de un péndulo es muy sencilla para medir inclinaciones en una sola dirección, pues basta con disponer en su extremo cualquiera de los dispositivos anteriores. Los mejores resultados se obtienen con un detector capacitivo, pero no es apropiado en zonas con elevada humedad. Un sensor de reluctancia variable o un transformador diferencial son las mejores opciones. Además no precisa realizar conexiones eléctricas en la parte móvil, lo que simplifica notablemente la construcción. La realización de un péndulo capaz de medir en las dos direcciones plantea dos problemas: impedir la rotación de la cabeza del péndulo y evitar el acoplamiento mutuo entre las electrónicas de medida de las dos componentes. En general, es preferible utilizar dos péndulos idénticos y, sólo cuando se construye un péndulo de considerable tamaño, optar por medir las dos componentes simultáneamente.

### Realización de un inclinómetro de péndulo vertical

Como aplicación se presenta la realización de un sensible inclinómetro de péndulo vertical. Este péndulo es capaz de registrar marea terrestre, siempre que esté correctamente instalado en un lugar estable desde un punto de vista mecánico y térmico. Se puede construir fácilmente, sin necesidad de contar con herramientas especiales. Los materiales que se utilizan son metacrilato para las partes aislantes y bronce para las placas conductoras y el cuerpo del péndulo. La figuras muestra el esquema del péndulo y su despiece. El péndulo y las armaduras fijas se realizan en bronce de 5 mm de espesor a partir de una pletina de 25 mm de anchura (las medidas no son críticas y se dan sólo a título informativo). La longitud del péndulo es de 100 mm y la longitud de las armaduras 30 mm.

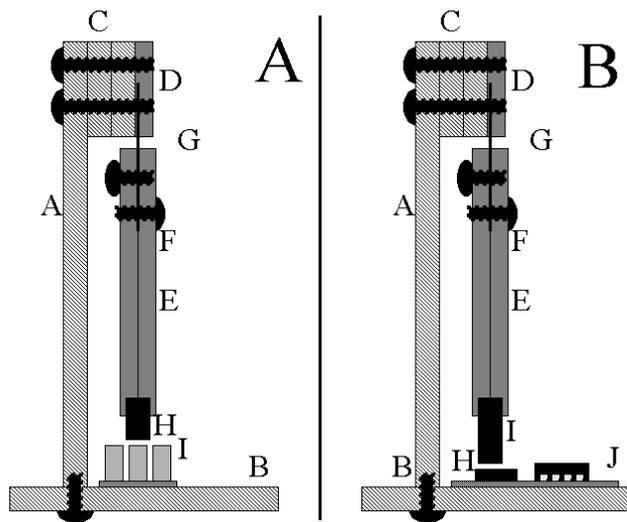


**Figura 7-41.** El inclinómetro está constituido por unos soportes S1 y S2, sujetos firmemente a la base B. Todas estas piezas están realizadas en metacrilato. El péndulo P está formado por dos piezas de bronce solidamente unidas mediante tornillos. Esta sujeto al soporte S mediante una cuchilla de afeitador C sujeta mediante separadores S3 y una pieza metálica S4. Las armaduras fijas E están sujetas mediante tornillos a las columnas S1 y S2. La separación entre el péndulo y las armaduras debe ser inferior a 5 mm. La longitud del péndulo es del orden de 80 mm y su anchura 25 mm. Las armaduras E y el soporte (S3) son de 30 mm de altura. La columna S1 es de 130 mm y S2 de 50 mm de altura



**Figura 7-42.** Despiece del péndulo. A y B columnas. C base. F armaduras fijas (dos piezas). E soporte superior. D separadores. G péndulo (dos piezas). H detalle de la sujeción de la cuchilla al péndulo y al soporte superior. Todos los tornillos son M4. Todas las piezas metálicas E, F (2), G(2) se realizan a partir de pletina de bronce (latón) de 25 mm de ancho y 5 mm de espesor. Las piezas de metacrilato se cortan de plancha de 15 mm de espesor.

El péndulo se realiza uniendo dos piezas iguales mediante tornillos, aprisionando en su parte superior una cuchilla de afeitadora. También se hace en bronce la pieza superior de sujeción de la cuchilla, de 30 mm de longitud. Todo el sistema está soportado por dos columnas de metacrilato de 10 mm de espesor y sujeto con tornillos a la plataforma de base realizada también con metacrilato de 10 mm. Para que el péndulo quede centrado en la parte superior se colocan piezas de metacrilato de forma que la separación sea de 1 a 2 mm a cada lado. Las distintas piezas que deben alojar tornillos se roscan adecuadamente (M4).



**Figura 7-43.** Dos variantes del inclinómetro de péndulo vertical. A corresponde a un montaje con transformador diferencial y B a un sensor de efecto Hall.

El péndulo presenta un periodo propio del orden de un segundo, dependiendo de las características de la cuchilla, del bronce empleado y de la separación entre el soporte superior y el cuerpo del péndulo. Los tornillos facilitan la conexión de los elementos metálicos con la electrónica, siendo conveniente utilizar pequeños terminales.

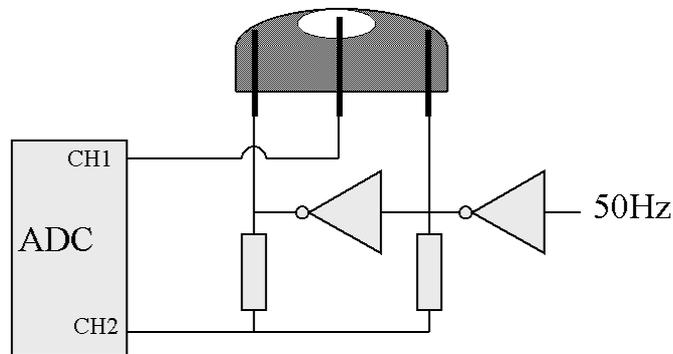
### Electrónica asociada

La electrónica del péndulo capacitivo es muy sencilla y responde al diagrama bloque presentado en la figura. Como circuito base se utiliza un multiplicador AD633, al que precede un amplificador adaptador de impedancias realizado con un LF156. Como generador se ha optado por un oscilador de cuarzo realizado mediante un oscilador divisor 4060 lo que permite elegir en un amplio juego de frecuencias del cristal de cuarzo y de trabajo. El filtro pasa-bajos es de cuatro polos, con configuración Sallen-Key. La alimentación es simétrica +8V, 0, -8V. La misma mecánica, con pocas variantes, permite ensayar otro tipo de sensores, como puede ser el transformador diferencial o un sensor de efecto Hall. La versión con transformador diferencial utiliza un NE5521 como circuito base, mientras que el sensor de efecto hall puede conectarse directamente al conversor analógico digital.

### Inclinómetro de burbuja

Actualmente es posible conseguir sensores de inclinación basados en un nivel de burbuja al que se le incorporan tres electrodos. Estos sensores presentan una buena sensibilidad y son de bajo coste. La electrónica asociada es muy sencilla. Se trata de

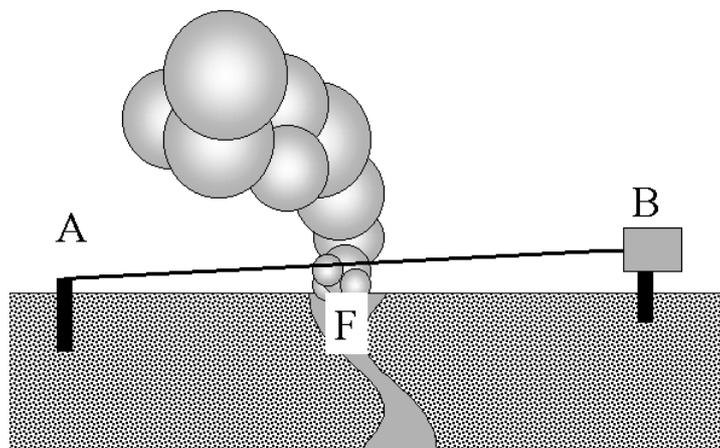
excitar el sensor con una corriente alterna para evitar fenómenos de electrolisis en el líquido y medir el potencial en el electrodo central. Para compensar los errores introducidos por las variaciones en la conductividad del líquido o en las resistencias de contacto la tensión de referencia para el conversor analógico digital se toma de un divisor resistivo conectado a los dos electrodos de excitación.



**Figura 7-44.** Inclinómetro de burbuja. Se excita con una onda cuadrada de 50 Hz y 5V. La señal de salida (CH1) varía entre 0 y 5V y la tensión de referencia se obtiene a partir del divisor resistivo (CH2).

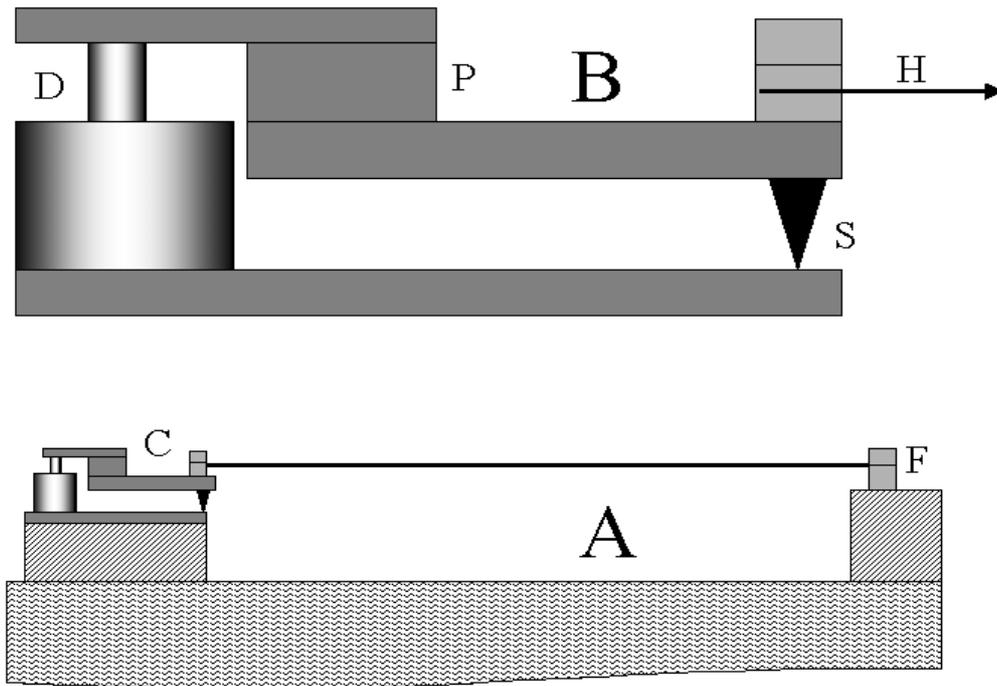
### Extensómetro

Un extensómetro es un instrumento muy simple y que sin embargo puede alcanzar grandes sensibilidades. Pueden utilizarse desde aplicaciones típicas de ingeniería como es la medida directa de la deformación en una construcción hasta el registro de las mareas terrestres o sismología de banda ancha. Aplicaciones típicas en volcanología incluyen el control de las fracturas abiertas en el curso de una erupción, evolución de un domo, control geodésico de intrusiones, colapsos de laderas, evolución de calderas, etc. Las dimensiones de los extensómetros van desde unos pocos milímetros, utilizados en la industria para la medida de la deformación en materiales o el control de grietas a varias decenas de metros en las aplicaciones de geofísica básica y geodinámica.



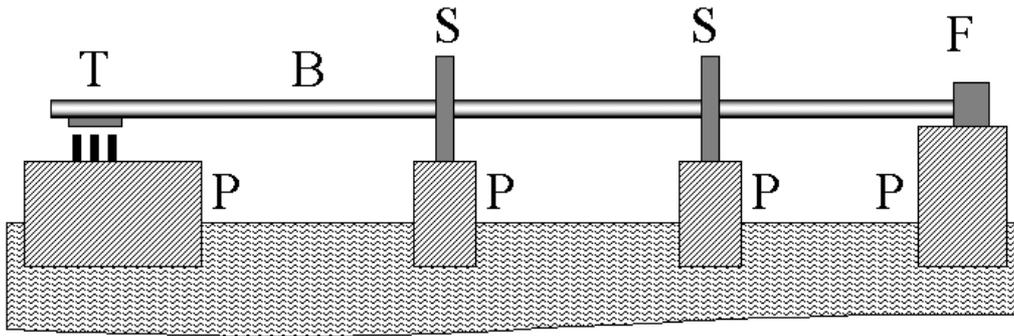
**Figura 7-45.** Un extensómetro muy simple consiste en un cable tenso que une un punto fijo A con otro punto B donde se encuentra un sensor de desplazamiento.

Un extensómetro típico utilizado en volcanología consiste en una barra, tubo o hilo sujeto a la roca por un extremo y a un captador de desplazamiento en el otro. La deformación de la roca se traduce en una variación de la distancia entre el extremo libre del extensómetro y la roca, el captador de desplazamiento da la medida directa de la deformación. En función de la sensibilidad que se quiera alcanzar se puede utilizar uno u otro tipo de sensor. En cada caso es necesario ensayar cual puede ser la mejor solución. Un extensómetro de hilo consiste en un hilo de invar o de inox, sujeto por un extremo a la roca y por el otro a una cabeza que lo mantiene en tensión y sirve de acoplamiento al captador de desplazamiento.



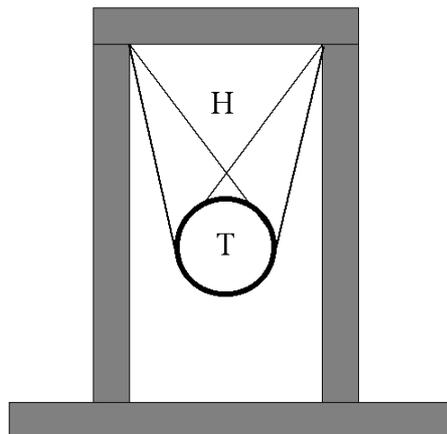
**Figura 7-46.** En A se presenta un extensómetro de hilo y en B el detalle de una cabeza: consiste en una suspensión S que permite a la palanca P girar en función de la tensión del hilo H. Esta suspensión se construye mediante un fleje de acero. En el otro extremo de la palanca se sitúa un detector de desplazamiento.

En general, la cabeza se diseña para que amplifique ligeramente los pequeños desplazamientos. La figura muestra un extensómetro típico de este tipo, cuya cabeza, de realización muy simple, está formada por una base soporte que se une mediante tornillos de anclaje al pilar, un brazo móvil (P) unido a la base mediante una articulación (S) que se puede realizar mediante una lámina flexible. Sobre el brazo se dispone un pequeño soporte centrado sobre la articulación en donde se sujeta el hilo. En el otro extremo se dispone un contrapeso que mantiene al hilo bajo tensión. En esta realización se utiliza un captador de tipo transformador diferencial cuyo núcleo móvil se sujeta al brazo mediante una pequeña pieza auxiliar. Es conveniente incluir algún dispositivo de amortiguamiento del cabezal como un baño de aceite. El mismo dispositivo se puede utilizar con distintos tipos de captadores de desplazamiento. El bajo coste de su realización permite construirlo con fines didácticos.



**Figura 7-47.** Extensómetro de barra: una barra está firmemente sujeta F a un pilar, en el otro extremo se sitúa un medidor de desplazamiento. La barra se mantiene en posición mediante las suspensiones S. Para colocar el sistema se construyen una serie de pilares P

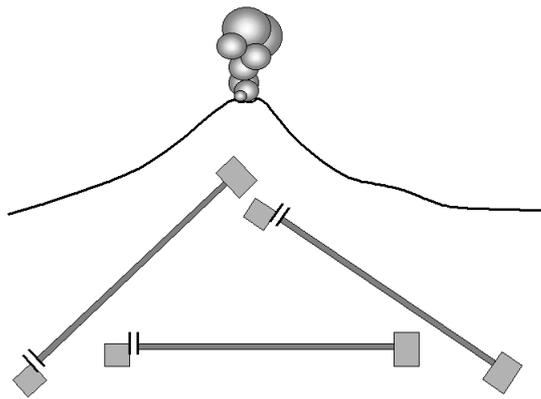
La mayor dificultad técnica de estos extensómetros de hilo es conseguir que la cabeza refleje perfectamente todos los movimientos del hilo. Para medir deformaciones muy pequeñas en grandes extensiones hay que acudir a un extensómetro de tipo rígido. Este extensómetro consta de un tubo de material no deformable y bajo coeficiente de dilatación térmica, como cuarzo, porcelana, invar o inox, sujeto firmemente por un extremo a la roca (F), en el extremo libre se sitúa un captador de desplazamiento (T) que mide la distancia entre una armadura fija a la roca y el extremo del tubo. Si el extensómetro es muy largo hay que incluir periódicamente un conjunto de soportes y suspensiones (S).



**Figura 7-48.** Esquema de la suspensión para un extensómetro de barra. La altura del puente es del orden de 300 mm.

Un sistema muy eficaz de suspensión desarrollado por el Prof. Cai Weixin por el Instituto de Sismología del State Seismological Bureau de Wuhan (China) consiste en utilizar una suspensión de hilo doble, de esta forma es posible centrar el tubo del extensómetro en vertical y horizontal.

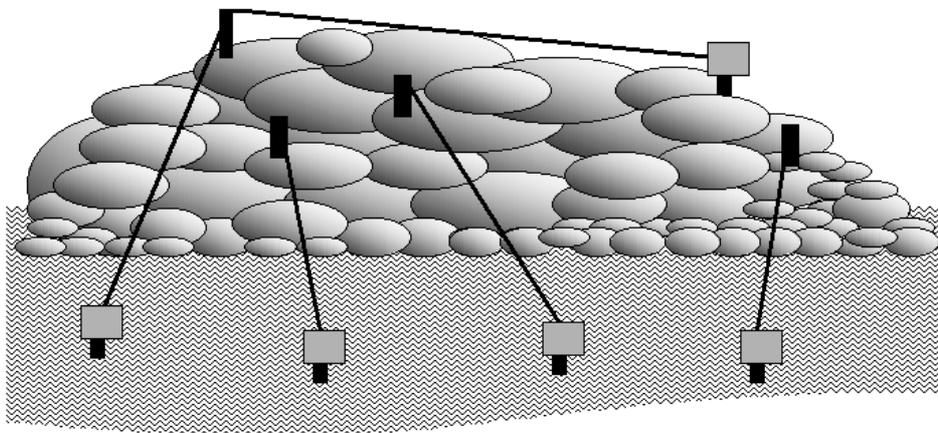
Los pequeños desplazamientos de los dos hilos que forman la suspensión se consigue girando los tornillos que sujetan a los hilos. La poca altura de estas suspensiones comparada con la longitud del extensómetro y la necesaria estabilidad térmica del emplazamiento, hacen que sea despreciable el efecto térmico sobre la suspensión. Esto permite construir los puentes y los soporte de las cabeceras en materiales fácilmente mecanizables como el latón. Algunos factores que deben considerarse al seleccionar el sensor son el margen de variación de longitud a medir, la amplitud de la oscilación de temperatura en el emplazamiento o la posibilidad de que el agua inunde al captor.



**Figura 7-49.** Para conocer el estado tensional de un volcán se requieren al menos tres extensómetros.

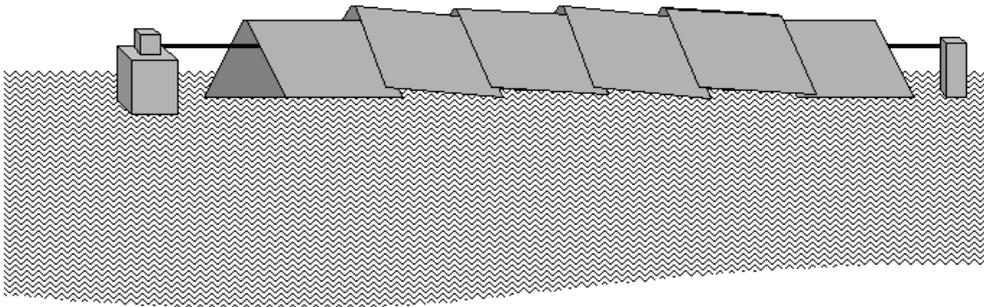
Un problema grave que surge en la explotación de los datos de los extensómetros de alta resolución es la compensación del efecto térmico. No tanto por la variación de temperatura del instrumento, sino por la deformación que experimenta la roca por la variación de los gradientes térmicos. Para ello es importante disponer de datos de la distribución de temperatura en la roca en la que está anclado el extensómetro.

La instalación de un extensómetro para aplicaciones sismológicas o geodésicas plantea muchos problemas en cuanto a estabilidad de la temperatura y de la roca, sólo instalaciones en túneles con más de 100 m de cobertera rocosa permite eliminar la influencia de las variaciones estacionales de temperatura. Para poder determinar el estado tensional de la roca es necesario disponer de un mínimo de tres extensómetros a  $120^\circ$ . En volcanología el monitoreo de la actividad del volcán a varios km del mismo requiere también el emplazamiento de los extensómetros en túneles, sin embargo, otras muchas de las aplicaciones se realizan con extensómetros de pequeñas dimensiones que se emplazan al aire libre o, a lo sumo, con una pequeña protección. La gran magnitud de los fenómenos a controlar permite despreciar los efectos térmicos. Sin embargo, se deberá cuidar, especialmente en estos casos, el problema de la corrosión. Las fracturas activas en muchas áreas volcánicas son en ocasiones identificables y por ello fácilmente instrumentables. Simples extensómetros situados a cada lado de la fractura permiten hacer un seguimiento de la evolución de la misma. Esta misma técnica se utiliza para el control de la deformación en laderas o el colapso de taludes.



**Figura 7-50.** Conjunto de extensómetros para conocer la evolución de un domo. La realización práctica es muy difícil y peligrosa.

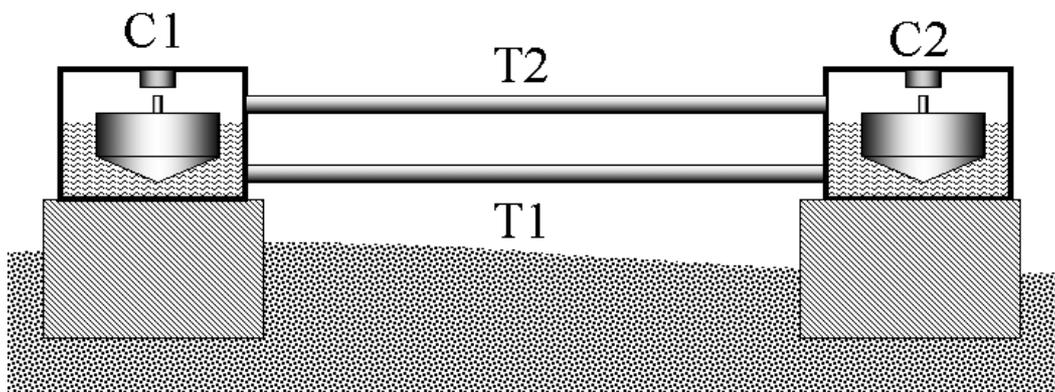
En todos los casos que el extensómetro se emplace al exterior deberá en lo posible aislarse térmicamente y protegerlo de las inclemencias del tiempo. Hay que cuidar que la protección no altere la marcha del instrumento, debe poderse deformar con el terreno y además ser lo suficientemente resistente. Una solución es utilizar tejados de madera con una capa de aislante térmico en su cara interior y dispuestas en forma de tejas, de forma que puedan desplazarse unas con respecto a otras. Las tejas se sujetan con piedras o con tirantes pero siempre de forma individual. Piénsese que en este tipo de aplicación los movimientos que se esperan son grandes. El mismo tipo de protección se aplicará a la cabeza sensora, donde además habrá que cuidar la protección contra los gases. Para ello lo mejor es encerrar todo el conjunto dentro de una caja hermética, entrando la barra del extensómetro a través de un fuelle. Para los extensómetros de cable se hará un pasamuros mediante una junta llena de grasa de silicona.



**Figura 7-51.** Protección de un extensómetro situado al aire libre.

### Clinómetro de agua

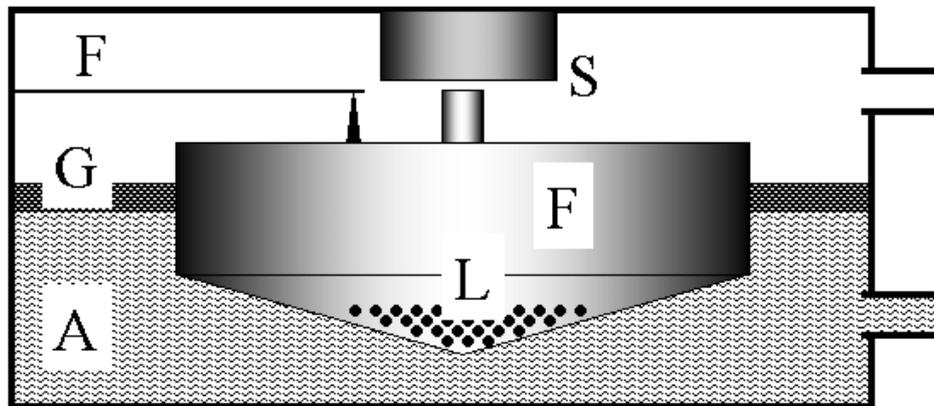
Este instrumento presenta unas excelentes características, es de bajo coste y puede construirse fácilmente. Su sensibilidad se puede adaptar con facilidad a las más variables condiciones de trabajo y sólo esta limitada por las condiciones del emplazamiento, especialmente la estabilidad térmica del mismo. El empleo de agua como indicador también limita la utilización de estos clinómetros a zonas donde las temperaturas no descieran por debajo de los 5°C.



**Figura 7-52.** Inclinómetro de agua, se trata de un sistema de vasos comunicantes, con un sensor de nivel de agua en cada cabeza C1 y C2. Se utilizan dos tubos para unir los vasos, T1 para el agua y T2 para igualar la presión en los dos extremos.

El instrumento es un sistema de vasos comunicantes, consta de dos depósitos unidos por un tubo y lleno de agua. Cuando se trata de instrumentos de considerable longitud se añade otro tubo para igualar la presión de los dos depósitos y disminuir el ruido provocado por la circulación de aire. Las dos cabezas se disponen sobre pilares solidamente anclados en la roca. Para soportar el sistema de tubos se dispone una serie de pilares intermedios. Los mejores resultados se obtienen con tubos de unión entre los depósitos rígidos (tubo de vidrio), pero en muchos casos se pueden utilizar satisfactoriamente tubo de plástico flexible.

Dentro de cada depósito hay un flotador cuya posición se mide mediante un sensor de desplazamiento, que puede ser capacitivo, de inducción o de reluctancia variable. En algunas realizaciones se ha dispuesto de un sistema interferométrico. Estos instrumentos tienen una gran tradición en la vigilancia de volcanes, pues fueron los primeros que se utilizaron en los volcanes hawaianos. En estas primeras realizaciones la medida de las inclinaciones se realizaba mediante un sistema micrométrico que se observaba visualmente. La distancia entre las dos cabezas suele ser del orden de varias decenas de metros y depende de la sensibilidad que se quiera alcanzar y de las disponibilidades de espacio. Como en todos estos instrumentos, las variaciones de temperatura establecen el límite de la sensibilidad del instrumento, tanto en sus efectos directos, que se pueden parcialmente corregir posteriormente en el procesado de los datos, como por su efecto en las rocas que es muy difícil de modelar. Hay que disponer una capa de aceite encima del agua para evitar pérdidas por evaporación. Igualmente hay que cuidar que no exista ninguna pérdida por goteo. Es importante realizar el llenado de agua sin que queden burbujas de aire, especialmente críticas resultan las uniones del tubo a las cabezas. Es un instrumento muy sencillo, pero que tiene una gran sensibilidad y bajo coste.



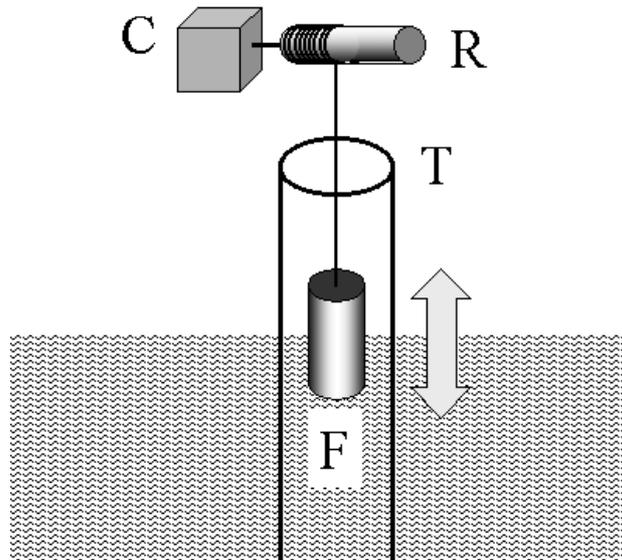
**Figura 7-53.** Ejemplo de cabeza de un inclinómetro de agua que utiliza un transformador diferencial S como sensor de desplazamiento. El flotador F está lastrado L para conseguir que el centro de gravedad esté muy bajo para mejorar la estabilidad. Un sistema de flejes F garantiza el centrado del flotador. Sobre el agua A se deposita una ligera capa de aceite G para evitar la evaporación.

En las proximidades de un volcán activo, es posible disponer el instrumento directamente en la superficie, separando los depósitos del orden de cien metros y utilizando captadores de desplazamiento de tipo transformador diferencial. A pesar de todas las precauciones siempre se produce alguna pérdida de agua, por lo que es necesario colocar dos cabezas activas para poder compensar las variaciones de nivel debida a las pérdidas que afectan por igual a ambas cabezas. La relación de diámetros entre las cabezas y los tubos de conexión define la frecuencia propia del sistema. Es

importante alejar esta frecuencia del ruido microsísmico de la zona, especialmente importante en regiones costeras.

## Mareógrafo

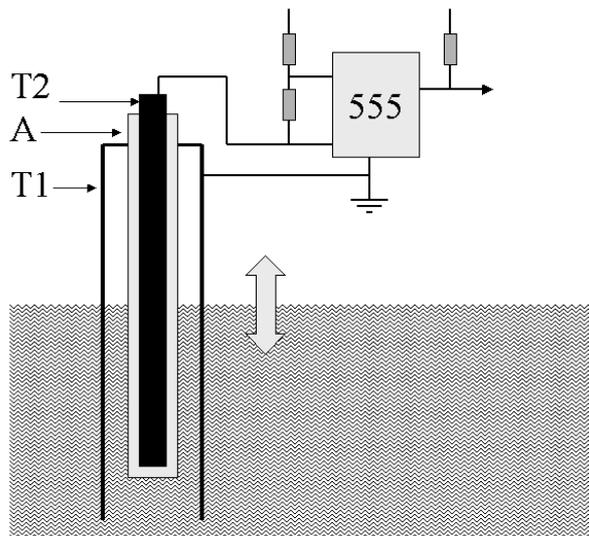
En zonas costeras es imprescindible disponer de una serie de mareógrafos para el control de la influencia de las mareas oceánicas en todos los demás instrumentos. Además, cuando las deformaciones son importantes, el control de los mareógrafos pueden detectar la elevación o hundimiento de la zona. Estos instrumentos también pueden utilizarse para el control del nivel piezométrico.



**Figura 7-54** Mareógrafo de flotador. El movimiento del flotador F se convierte en una señal eléctrica mediante un codificador óptico C. El cable que une el flotador se recoge en un rodillo tensado por resortes o por un contrapeso.

El mareógrafo más sencillo está formado por un flotador colgado de un cable que se arrolla en un cilindro. Un codificador angular transmite la posición del flotador al sistema de adquisición de datos. El cable se recoge mediante un contrapeso, un sistema de resorte o mediante un servomotor. En todos los mareógrafos es importante disponer el sistema dentro de un tubo para amortiguar el oleaje.

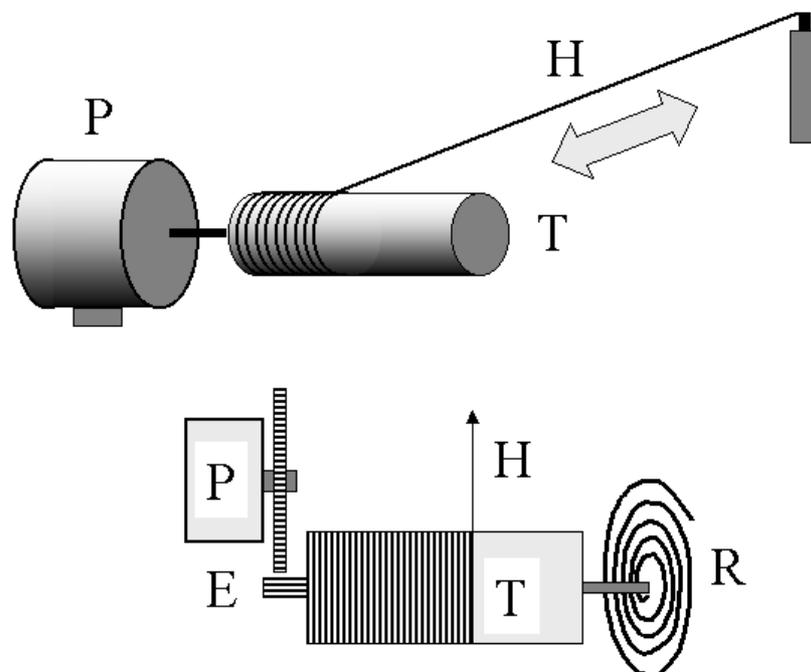
Un sistema muy sencillo y de alta resolución consiste en utilizar un sensor capacitivo formado por dos tubos concéntricos, y el interior aislado eléctricamente. De esta forma, al subir o bajar el nivel del agua entre ambos tubos varía la capacidad y un sencillo dispositivo electrónico permite medir el nivel del agua. Sin embargo, la acumulación de suciedad o el crecimiento de algas limitan la aplicación práctica de este sistema. Actualmente están muy extendidos los mareógrafos basados en el empleo de un sensor electrónico de presión. En estos casos hay que elegir un tipo que sea compatible con el agua durante mucho tiempo. En los catálogos de sensores industriales es posible encontrar muchos tipos que cumplen con esta especificación. Otra solución consiste en disponer el sensor en una cámara aislada con una membrana o un fluido intermedio que evite el contacto con el agua, de esta forma es posible utilizar sensores de presión de bajo coste.



**Figura 7-55.** Mareógrafo capacitivo. Se trata de dos cilindros conductores T1 y T2. T2 está aislado mediante un tubo de plástico A. La capacidad entre T1 y T2 se mide con un simple oscilador realizado con un circuito 555.

### Sensor para grandes desplazamientos

Cuando se trata de medir desplazamientos de varios milímetros, pero que pueden llegar a ser de centímetros o decímetros y que no van a presentar repetidas fluctuaciones, podemos utilizar un simple potenciómetro como sensor. Para ello se acopla al eje del potenciómetro un cilindro sobre el que se arrolla un cable que se mantiene tenso mediante un sistema de resortes. Un campo de aplicación típico es monitorizar una grieta que se está abriendo.

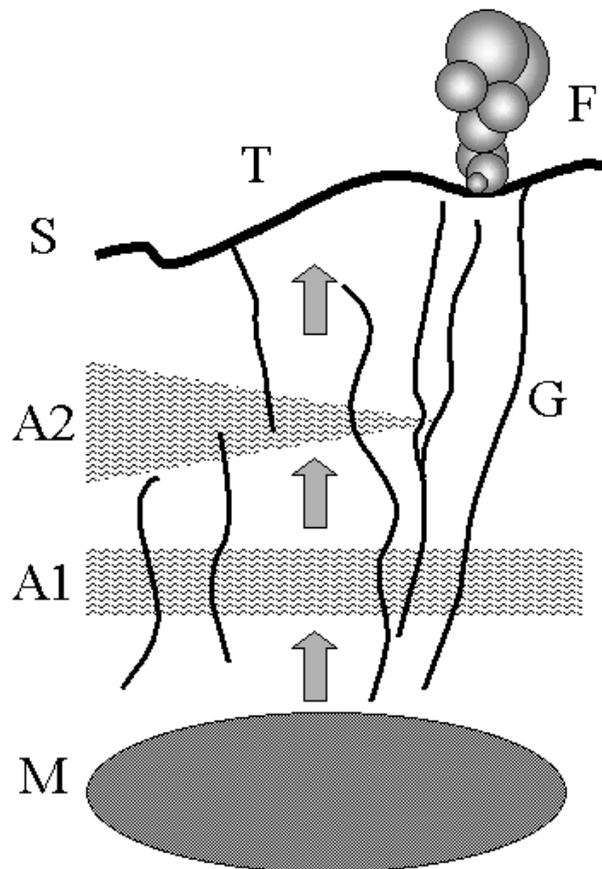


**Figura 7-56.** Sensor potenciométrico para grandes desplazamientos. La posición del potenciómetro P depende de la longitud del cable H que se extiende. Un resorte mantiene el cable bajo tensión. Puede utilizarse un potenciómetro simple o uno multivuelta.

## OTRAS TÉCNICAS PARA EL SEGUIMIENTO DE LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA

### Medida de temperaturas

La medida de temperaturas es una de las técnicas más antiguas en el estudio de la actividad volcánica. Sin embargo no es sencilla, ya que frecuentemente se encuentran temperaturas muy altas, en ambientes muy agresivos y que no resultan fáciles de medir con los métodos tradicionales. La medida de temperaturas en una zona volcánica activa presenta múltiples aspectos, que abarcan desde la espectacular medida de la temperatura de una lava incandescente hasta la humilde, pero no sencilla, medida de la temperatura de un lago o de una roca. Un aspecto importante, que no debe olvidarse cuando se está trabajando en el estudio de las anomalías térmicas en una área volcánica activa, es que la temperatura que se mide es la manifestación de un complejo mecanismo de transmisión de calor.



**Figura 8-1.** Un aparato volcánico debemos considerarlo desde el punto de vista de la termometría formado por un foco térmico M que puede ser una cámara magmática somera, un conducto magmático o restos de las últimas erupciones y que todavía permanecen calientes. Un sistema de fracturas G que de forma más o menos directa nos conecta el foco térmico con el exterior o con niveles superiores. Además existen acuíferos que tanto pueden abarcar toda la zona A1 o estar limitados A2. Estos acuíferos pueden estar confinados y sellados con fluidos a alta presión. En superficie aparecerán fumarolas F cuando el flujo de gases es elevado y sólo suelos calientes cuando estos se diluyen con el aire T.

Este proceso de transmisión de calor es siempre complejo y no tiene porque haber alcanzado el equilibrio. En él confluyen fenómenos de conducción en tres dimensiones, junto con procesos convectivos y ablativos, que en muchos casos llevan asociados cambios de fase y todo ello en un sistema del que se desconoce su estructura. Por ello, la significación que puede ofrecer una variación de temperatura en un volcán es siempre por sí misma de difícil explicación. La transmisión de calor del foco a la superficie, donde se encuentran los termómetros, se realiza mediante un mecanismo de transporte por fluidos a través del sistema de fracturas (convección-ablación) y también por conducción. El transporte de calor por conducción es siempre de muy poca entidad, pues el coeficiente de conductividad de las rocas es muy pequeño y es un mecanismo muy lento, pues la difusividad de las rocas es también muy pequeña. Por ello, en general, se desprecia salvo a escalas muy pequeñas o muy grandes. La influencia de los acuíferos es muy grande, pues el agua se mezcla con los gases, disolviendo algunos componentes y equilibrando temperaturas. Los acuíferos fuertemente variables, como aquellos que están influenciados por las mareas, son capaces de transportar información térmica a termómetros situados a grandes distancias del volcán: al subir la marea, entra agua fría en el sistema y la temperatura de los termómetros disminuye ligeramente, al bajar la marea el agua se retira pero ahora el agua procede de zonas más calientes y la temperatura de los termómetros asciende ligeramente. Cualquier variación en la distribución de temperaturas en el interior del sistema se puede detectar, si se mide con precisión, este pequeño cambio en la temperatura del acuífero mareal. Situaciones parecidas se pueden encontrar en otros acuíferos relacionados con el sistema volcánico. Sólo es necesario disponer de termómetros capaces de medir esas pequeñas fluctuaciones y sistemas para registrarlas.

Las medidas de temperatura que pueden hacerse en un volcán se reducen al control de la temperatura de las fumarolas, de las anomalías térmicas, ya sean fuentes termales o suelos calientes, lagos crátericos y temperatura de roca. La primera pregunta que debemos plantearnos es qué temperatura se quiere medir, lo que implica conocer cual será su margen de variación, la precisión requerida en la medida y si es necesario que el sensor permanezca por largo tiempo fijo en la zona. Después podemos preguntarnos si la temperatura debe medirse de forma automática o manual, si se requiere telemetría o no. Debe tenerse siempre presente, cuando se trata de medir temperaturas en un volcán activo, que nos vamos a encontrar con grandes fluctuaciones de temperatura, consecuencia de los cambios de la presión atmosférica, de la radiación solar, del mayor o menor contenido en agua en los acuíferos, etc., que van a enmascarar las variaciones que realmente reflejan un cambio en las condiciones del volcán. Por ello se deben utilizar resoluciones relativamente elevadas y someter los datos obtenidos a un riguroso procesado y análisis, antes de atreverse a emitir un informe sobre los mismos. En general, nos vamos a encontrar con temperaturas que abarcan de 40°C a 800°C y que se deberán medir con resoluciones mínimas de 1°C en fumarolas, de 0.1°C en aguas y mejor de 0.001°C en rocas. Ello nos va a exigir utilizar siempre conversores de alta resolución, mínimo 12 bits y en lo posible conversores de 24 bits o conversores tensión frecuencia de alta linealidad que permitan obtener resoluciones de  $10^{-5}$  °C.

Actualmente es posible disponer de múltiples sensores de temperatura, aunque en realidad son bastantes menos de lo que parece. En el cuadro se recogen las características de las principales familias de termómetros:

Fundamento		Características	
Dilatación	Gas	altas temperaturas	
	Líquido	clásico termómetro de mercurio	
	Metal	alta temperatura	
	Bimetal	industrial, alta y baja temperatura	
Resistencia	Metal	resistencia de platino, muy alta precisión	
	Semiconductor	Pasivo	baja linealidad, histéresis
		Activo	alta precisión, margen limitado
Termopar		altas temperaturas, necesita referencia	
Radiación	Infrarrojo	sin contacto, altas temperaturas	
	Visible	sin contacto, muy altas temperaturas	
Elasticidad		oscilador de cuarzo, muy alta precisión	
Acústico		sin contacto, temperatura de fluidos	

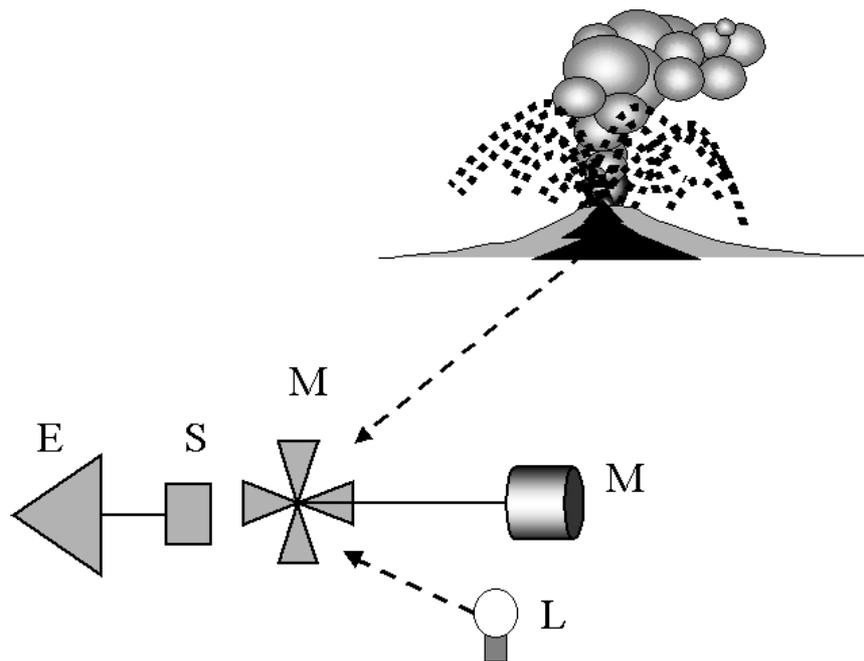
En el cuadro podemos destacar varios aspectos: hay una serie de termómetros que no requieren contacto físico, estos pueden utilizarse para medir temperaturas a distancia, como es el caso de una colada de lava o la actividad stromboliana. Otros, por el contrario, requieren contacto térmico con el medio a medir, este contacto siempre presenta una resistencia térmica, la cual falsea la medida, y lo que es más grave, puede variar con el tiempo. Todos los termómetros que se basan en la dependencia térmica de las propiedades eléctricas, requieren utilizar una electrónica asociada, la cual puede plantear serios problemas a temperaturas extremas. Algunos sensores precisan de una calibración continua, como es el caso del infrarrojo, otros, de una referencia como los termopares, y en general, todos ellos requieren un adecuado estudio para pasar de la indicación que nos da el termómetro a la temperatura del medio que queremos medir. Este punto es especialmente importante en volcanología, donde las temperaturas se miden donde se puede y no donde se desearía.

Los sensores de temperatura, para que tengan sentido en el estudio de un volcán, deben situarse en zonas muy activas, como una fumarola o un lago cratérico, donde están sometidos a un medio tremendamente agresivo, y si no se adoptan todas las precauciones, en pocas horas pueden resultar totalmente destruidos. La protección debe abarcar todos los elementos.

Los sensores remotos no plantean este problema, al menos de forma tan grave, aunque si se disponen demasiado lejos de la zona a medir, incluso a temperaturas moderadamente altas (500°C) su utilidad práctica es nula, ya que precisan de muchas correcciones y calibraciones. A altas temperaturas (1000 °C) pueden utilizarse con éxito con relativamente pocas correcciones, funcionando tanto mejor cuanto más alta sea la temperatura a medir. Sensores de este tipo, dispuestos en aviones o satélites constituyen un buen sistema, aunque muy costoso, de monitoreo térmico de volcanes difícilmente accesibles.

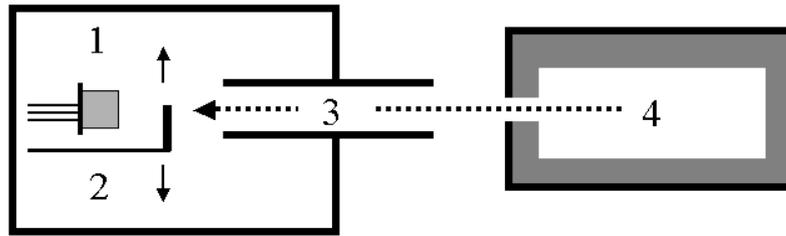
## Radiómetro

El radiómetro permite estimar la temperatura de un cuerpo basándose en la radiación que éste emite. Para ello hay que hacer una serie de asunciones, tales como que la emisividad del cuerpo es la del cuerpo negro, que la atmósfera interpuesta no absorbe radiación, y la temperatura del cuerpo es homogénea. En la práctica es imposible disponer de un radiómetro que permita medir la temperatura a distancia sin realizar una calibración específica. Sin embargo, son útiles para conocer las variaciones de temperatura (o emisión gaseosa o ambas). Hoy es fácil realizar un radiómetro utilizando sensores infrarrojos o piroeléctricos y calibrándolos para cada aplicación específica.



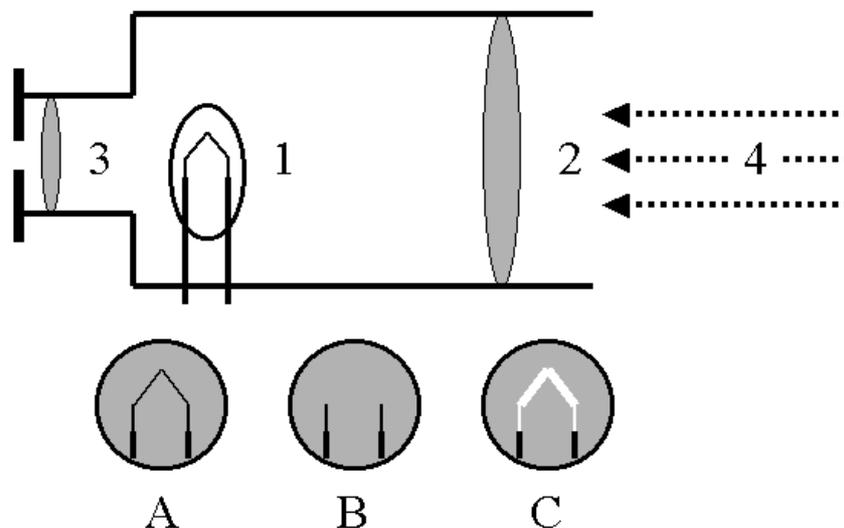
**Figura 8-2.** Esquema básico de un radiómetro. Consta de un sensor S con su electrónica asociada E, sobre el que incide alternativamente la radiación procedente del objeto a medir y de una fuente de referencia L. Un mecanismo modulador M movido por un motor obtura alternativamente los dos rayos.

Para temperaturas moderadamente altas puede utilizarse un detector de infrarrojo, pero a bajas temperaturas la relación señal / ruido es muy pobre, ya que la emisión en la banda de longitudes de onda donde presentan la máxima sensibilidad estos detectores es muy pequeña. Por ello es preferible utilizar sensores piroeléctricos, como los empleados en los sistemas de alarmas que permiten detectar la presencia de intrusos basándose en la radiación emitida a la temperatura del cuerpo humano. El efecto piroeléctrico consiste en el desplazamiento de cargas en el seno de un semiconductor cuando éste recibe radiación infrarroja pero que al aumentar su temperatura vuelve al estado original. Por este motivo es necesario interrumpir periódicamente el haz infrarrojo que ilumina al sensor. De este modo, a la salida obtendremos una señal periódica correspondiente al movimiento periódico de las cargas. Para facilitar su manejo, los fabricantes de sensores piroeléctricos dotan a estos ya de un amplificador integrado para la adaptación de impedancias.



**Figura 8-3.** Radiómetro: 1 sensor piroeléctrico, 2 modulador mecánico realizado mediante un bimorfo, 3 colimador, 4 fuente de infrarrojos para calibración (horno).

En esta aplicación se puede utilizar un sensor piroeléctrico del tipo habitualmente utilizado en dispositivos de control de presencia (alarmas) y para su operación es necesario modular el haz infrarrojo que vienen de la fuente. Para ello se dispone delante de la ventana del sensor un vibrador que interrumpe periódicamente el haz que incide sobre cada una de los sensores. El sensor elegido es diferencial, por lo que presenta una buena estabilidad térmica y la señal que proporciona es razonablemente aceptable, incluso a distancias considerables de la fuente (lógicamente, al aumentar la distancia, aumenta la superficie promediada). Una aplicación típica puede ser el seguimiento de la temperatura de unas anomalías térmicas, un lago de lava, etc. Para ello se dispone el sensor en una zona alejada, razonablemente protegido de las emisiones gaseosas, conectado a un sistema de adquisición de datos o de telemetría. Puede dotarse de un sistema mecánico que permita hacer el barrido del cráter.



**Figura 8-4.** Pirómetro óptico: 1 lámpara de incandescencia con corriente controlada, 2 objetivo, 3 ocular, 4 radiación térmica (visible). Se muestra también el aspecto que presenta el filamento de la lámpara cuando la temperatura de la lámpara es menor que la temperatura de la fuente (A), cuando ambas son iguales (B) y cuando es superior (C).

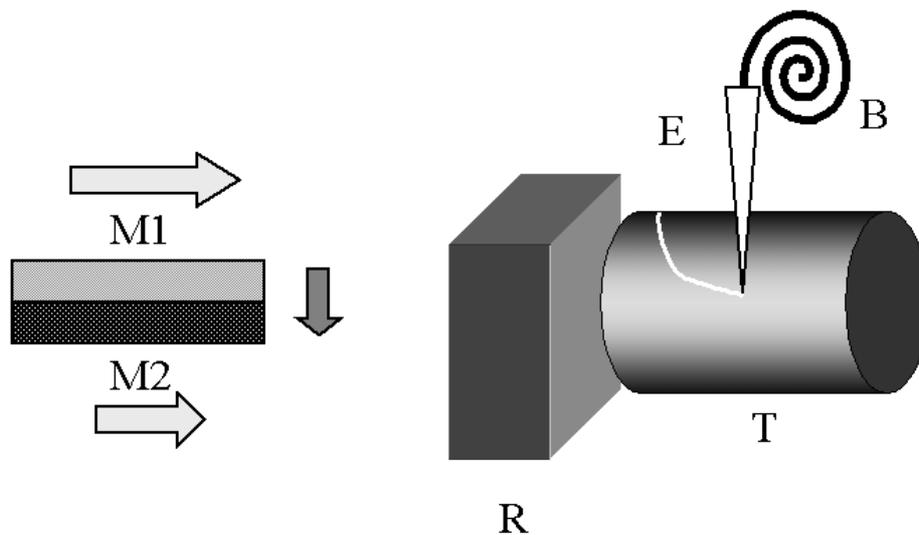
### Pirómetro óptico

Esta técnica se basa en comparar el espectro visible de la fuente térmica con una lámpara de referencia. Es muy útil a temperaturas por encima de los 900°C y puede realizarse de modo muy económico. La realización práctica más sencilla consiste en un

telescopio en cuyo plano focal se sitúa una pequeña lámpara, cuya corriente se controla mediante un dispositivo electrónico. Se busca la coincidencia de brillos entre el filamento de la lámpara y la fuente térmica. Se calibra fácilmente con un horno y un termopar. Se utilizan ampliamente para la medida de temperaturas de las fuentes de lavas, donde es fácil aproximarse y las temperaturas son superiores a 1100 °C.

### Termómetros mecánicos

Los sensores mecánicos, que utilizan la dilatación de un metal o un bimetal son muy robustos, pudiéndose encapsular bien todo el dispositivo y diseñar para temperaturas muy altas. Este tipo de sensores se utiliza con éxito para la medida de las temperaturas en sondeos geotérmicos, donde, por la propia complejidad del sondeo y las altas temperaturas y presiones existentes en el fondo, no es posible utilizar con garantía sensores electrónicos convencionales, pues los componentes electrónicos sólo permiten diseñar fácilmente sistemas que puedan funcionar a menos de 150 °C. Esos elementos son ampliamente utilizados en la industria, bien como termómetros, bien formando parte de sistemas de regulación. Una aplicación bien conocida de estos sensores lo constituye el termostato del radiador de los automóviles: un elemento de bimetal se encarga de abrir o cerrar el paso del agua. Los termómetros de bimetal son robustos y de bajo costo, pudiéndose diseñar para un margen muy amplio de temperaturas.

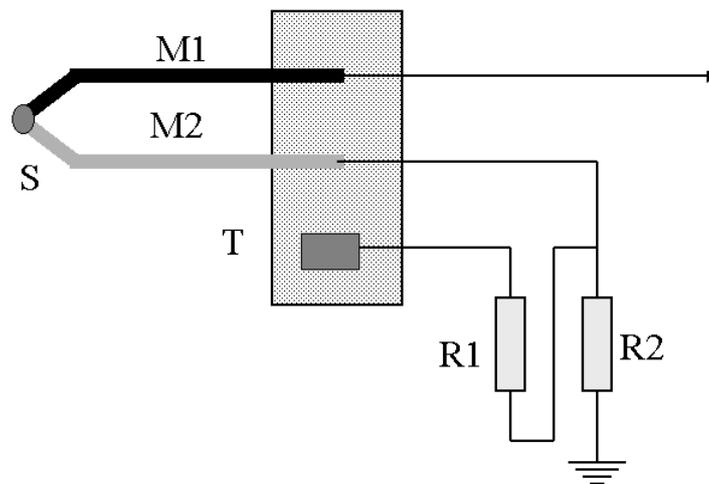


**Figura 8-5.** Termómetros de bimetal. Un bimetal es un dispositivo formado por la unión de dos metales M1 y M2 de coeficiente de dilatación diferentes. Al dilatarse uno más que el otro el dispositivo se deforma, curvándose. Un registrador de temperaturas enteramente mecánico consta de una espiral de bimetal B, unida a un estilete E que raya la superficie de un cilindro T. Este cilindro gira lentamente arrastrado por un dispositivo de relojería R.

Todos ellos utilizan un bimetal doblado en espiral que, mediante un sistema de palancas, mueve el mecanismo indicador. Estos termómetros han sido durante muchos años los únicos dispositivos prácticos lo suficientemente robustos para medir temperaturas en el margen 200°C a 600°C en el campo. Actualmente, los termómetros que utilizan un termopar e indicación electrónica los han desplazado totalmente como termómetros portátiles para este margen de temperaturas. Un termógrafo de bimetal consta de una cinta de bimetal, que a través de un sistema de palancas mueve un estilete

que raya un cilindro de cobre ennegrecido con humo que gira arrastrado por un mecanismo de relojería. La medida de la temperatura de un sondeo geotérmico se realiza descendiendo rápidamente el sensor por el sondeo hasta alcanzar la profundidad deseada, en ese punto el sensor se mantiene durante varias horas, mientras el sondeo evoluciona térmicamente tendiendo a alcanzar su temperatura de equilibrio. La evolución de la temperatura del sondeo queda registrada sobre el cobre. El estudio del registro proporciona un método para conocer cual será la temperatura que alcanzará el sondeo. La evolución de la temperatura en el sondeo obedece a una expresión del tipo:

$$T(\tau) - T_0 = (T_\infty - T_0) \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\lambda}}\right)$$



**Figura 8-6.** Un termopar está formado por la unión de dos conductores M1 y M2 con potenciales termoelectrónicos distintos. La tensión que aparece entre sus extremos es proporcional a la diferencia de temperaturas. Para medir temperaturas absolutas es necesario introducir un circuito compensador T. El divisor resistivo R1, R2 permite ajustar la sensibilidad del termómetro compensador a la del termopar.

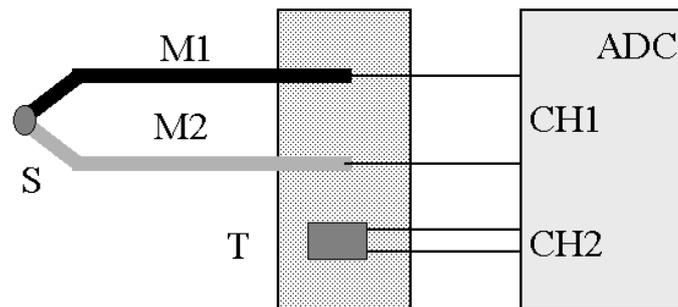
### Termómetros eléctricos

La otra gran familia de sensores son los de tipo eléctrico, entre ellos los más extendidos son los termómetros de resistencia, cuyo valor varía con la temperatura, y los termopares, que proporcionan una tensión proporcional a la diferencia de temperatura entre sus uniones. Actualmente, se están desarrollando otros sensores que aprovechan otras propiedades como es la tensión de zener de un diodo o la frecuencia de oscilación de un cristal de cuarzo. Todos los termómetros que se basan en la dependencia de las propiedades eléctricas de ciertos materiales con la temperatura requieren la utilización de una electrónica capaz de medir dicha propiedad y de unos cables de conexión entre el sensor y el módulo electrónico. Los componentes electrónicos deben funcionar siempre por debajo de 150°C, y en general por debajo de 75°C, ello implica que el dispositivo electrónico debe situarse en una zona de baja temperatura e incluso protegido de la radiación solar. También las baterías deberán protegerse de las altas temperaturas. El sensor está unido mediante conductores eléctricos, los cuales también deberán soportar el mismo límite de temperaturas que el sensor. De poco sirve un sensor que pueda trabajar a 880°C si los cables se destruyen a 400°C. Igual precaución deberemos tener

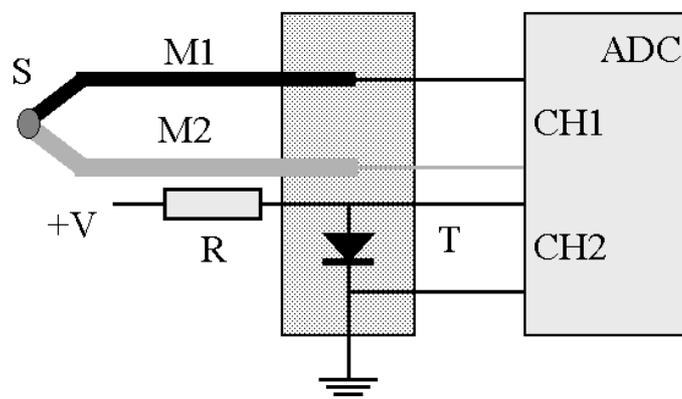
con las soldaduras del sensor a los cables. La electrónica asociada puede llegar a complicarse bastante ya que la respuesta de estos sensores a los cambios de temperatura es siempre muy pequeña y en algunos casos es necesario introducir elementos para linealizar la respuesta del sensor. Afortunadamente, es posible conseguir circuitos monolíticos que a un precio razonable nos dan resuelto el circuito de aplicación práctica de estos sensores. Estudiando la evolución temporal de la temperatura del sondeo  $T(\tau)$  podemos fácilmente determinar la temperatura de equilibrio  $T_\infty$ .

### Termómetros de termopar

Para altas temperaturas prácticamente sólo pueden utilizarse termopares. Estos dispositivos son habituales en la industria, por lo que es posible adquirirlos sin ninguna dificultad y a bajo precio. En general es fácil encontrar termopares ya encapsulados que pueden operar satisfactoriamente a  $1100^\circ\text{C}$  en ambientes agresivos, más que suficiente para todas las aplicaciones prácticas que podemos encontrarnos en un volcán. Hay que cuidar que el encapsulado sea resistente a los gases presentes en las fumarolas. La longitud del termopar debe ser suficiente para colocar la electrónica de medida en una zona de baja temperatura. La soldadura de los dos metales que constituye el termopar es un punto muy frágil por lo que debe protegerse especialmente de la corrosión y especialmente de esfuerzos mecánicos.



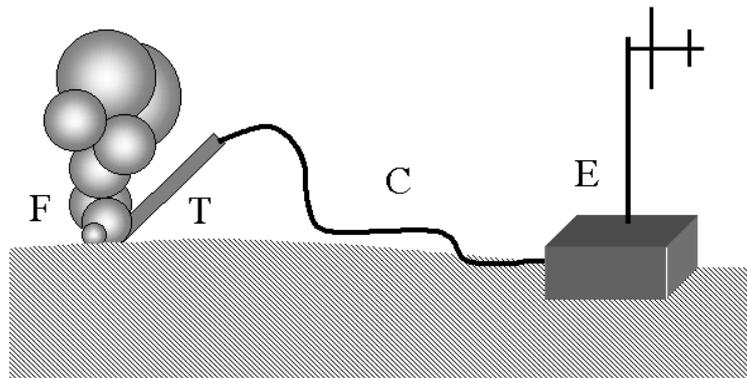
**Figura 8-7.** Actualmente es preferible realizar la compensación de la temperatura de referencia del termopar numéricamente, utilizando un conversor analógico digital de alta resolución con dos canales de entrada.



**Figura 8-8.** Cuando la temperatura ambiente varía poco y no se requiere gran precisión en la medida de altas temperaturas es suficiente utilizar un diodo de silicio como el IN4148 para compensar la temperatura de referencia. Dado el bajo precio que tienen hoy los termómetros monolíticos como el LM35 es preferible su utilización, simplificándose la calibración del sistema y mejorando el margen de operación.



La utilización de los termopares para la medida de altas temperaturas es habitual en la industria desde hace más de 100 años. Son elementos robustos, que resisten bien las altas temperaturas y con buenos encapsulados para hacer frente los ambientes más agresivos. Al ser de uso habitual en la industria, comercialmente se encuentran muchos medidores de temperatura adaptados a los tipos de termopar más utilizados y que se pueden adquirir a muy bajo precio, por lo que prescindiremos de entrar en el diseño de uno de ellos, limitándonos a presentar un dispositivo que permite adaptar un termopar a un sistema de adquisición de datos o a un sistema de telemetría.



**Figura 8-10.** La temperatura de una fumarola puede medirse con un termopar T envainado en un material que resista la corrosión de los gases y las altas temperaturas. La unión al sistema de medida E se realiza mediante un cable de compensación C adecuadamente protegido.

Las características más destacadas de los termopares estándar utilizados actualmente se presentan en la siguiente tabla:

Tipo	Metales	Sensibilidad $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (a $0^\circ\text{C}$ )	Rango $^\circ\text{C}$
J	Hierro / Níquel Cobre	52.3	-200 a 850
T	Níquel Cromo / Níquel Aluminio	42.8	-50 a 200
K	Níquel Cromo / Níquel Aluminio	40.8	-200 a 1100
N	Níquel Cromo Sílice / Níquel Sílice	40.8	-230 a 1230
R	Platino / Platino Rodio	6.4	-200° a 1350°

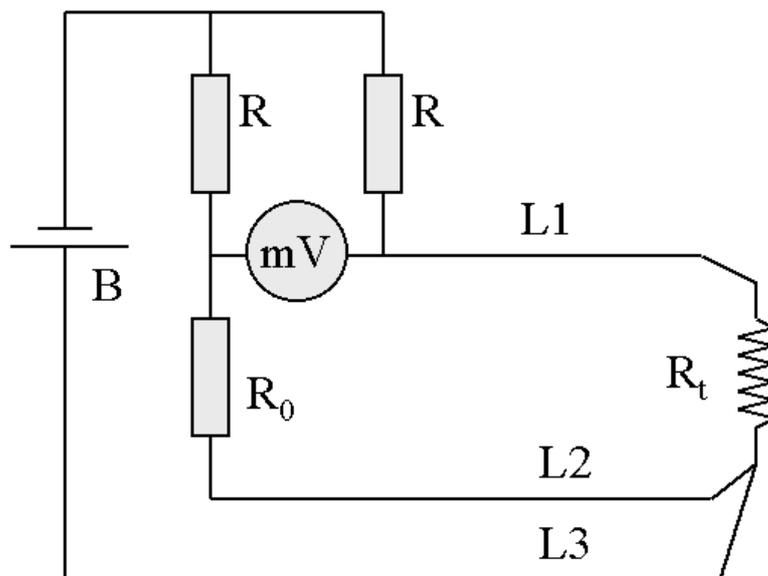
Nota: estos valores pueden variar ligeramente en función de las distintas aleaciones, del tipo de unión empleada y del margen de temperaturas en el que se definen los coeficientes. Para un termopar tipo K (*cromel-alumel*) la discrepancia en todo el margen es menor de 1%. Actualmente el termopar de tipo K es el más extendido, del que existen más versiones de encapsulado y con un precio muy competitivo. Como su rango práctico de temperaturas se extiende hasta los  $1100^\circ\text{C}$  ( $1300^\circ\text{C}$  para cortos períodos de tiempo) cubre perfectamente las necesidades habituales en vigilancia de volcanes.

La aplicación más extendida de los termopares en volcanología es la medida de temperaturas en fumarolas de temperaturas medias y altas ( $100^\circ\text{C}$  a  $800^\circ\text{C}$ ), tanto en medidas puntuales como continuas. En este último caso hay que tener presente que los encapsulados resistentes a la corrosión y a las altas temperaturas son relativamente caros

y rígidos, por lo que el diseño del sistema de termopar se suele hacer en dos tramos: el primero va a estar todo él sometido a muy altas temperaturas y en ambiente muy agresivo, se elige con encapsulado anticorrosión y de alta temperatura, para el segundo tramo, que trabajará a temperaturas medias y bajas ( $<400^{\circ}\text{C}$ ) se elige un tipo con flexible, con aislamiento de amianto o de *teflón*. De esta forma se consigue un dispositivo de costo moderado, con longitud suficiente para poder disponer el sistema electrónico lejos, protegido de los gases de la fumarola y a temperatura moderada. Para un termopar de tipo K, operando con una diferencia de temperaturas entre sus extremos de  $400^{\circ}\text{C}$ , la tensión nominal que podemos esperar es del orden de sólo  $16.4\text{mV}$ , por lo que deberemos incluir, además del circuito compensador de la temperatura de referencia un pequeño amplificador, de forma que obtengamos una señal suficiente para aprovechar al máximo la resolución del sistema de adquisición de datos utilizado.

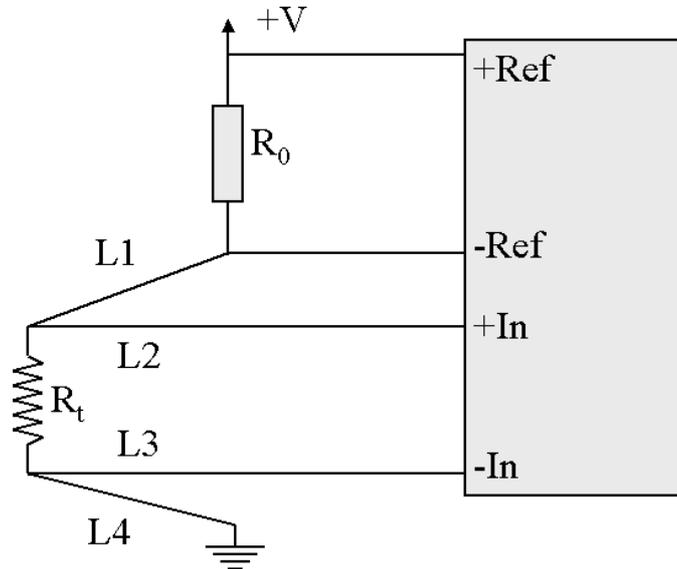
### Termómetros de resistencia

La otra gran familia de termómetros corresponde a los termómetros de resistencia, entre ellos el estándar de platino PT100. Son elementos robustos, de muy buena precisión y que pueden operar con encapsulados adecuados hasta  $400^{\circ}\text{C}$ , siendo su cualidad más importante la estabilidad a largo plazo y la intercambiabilidad entre distintos sensores que garantiza precisiones absolutas superiores a  $0.1^{\circ}\text{C}$ . Todos ellos se utilizan midiendo las variaciones de resistencia mediante un dispositivo en puente con un montaje en tres o cuatro hilos a fin de compensar la resistencia de los conductores. Actualmente, especialmente en el rango  $-50$  a  $150^{\circ}\text{C}$ , están siendo rápidamente desplazados por dispositivos de semiconductores, que ya incluyen en su interior la electrónica necesaria para su utilización práctica. En volcanología solamente se pueden utilizar en aplicaciones de bajas temperaturas, como puede ser el control de la temperatura de un lago cratérico, de un suelo caliente o de una fuente termal.



**Figura 8-11.** Montaje en puente de tres hilos para la medida de una resistencia. Si las resistencias de los cables L1, L2 y L3 son similares y muy inferiores a R, el dispositivo cancela la resistencia de los cables y su variación con la temperatura.

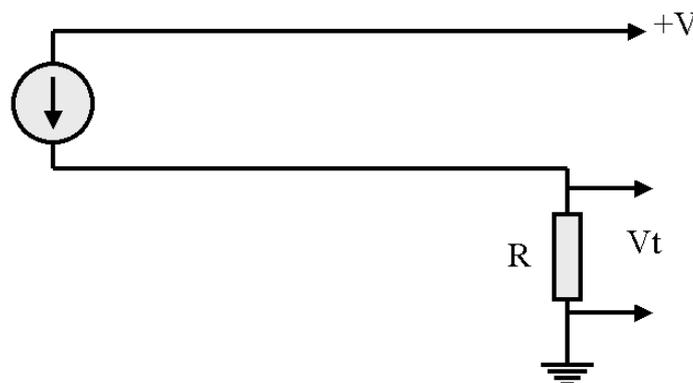
La utilización de un termómetro de resistencia, como el PT100 requiere utilizar siempre un montaje en puente de 3 hilos para poder compensar la influencia de los cables de conexión. Si  $R_t$  es el sensor de temperatura y se eligen las resistencias del puente de forma que  $R_0$  sea igual a  $R_t$  a  $0\text{ }^\circ\text{C}$  y las otras dos  $R$  iguales entre sí, los cables  $L1$  está en serie con  $R_t$  y  $L2$  con  $R_0$  y si  $R$  es mucho mayor que la resistencia de  $L$ , la influencia de la resistencia de los cables de medida y de su variación con la temperatura queda cancelada.



**Figura 8-12.** Montaje de cuatro hilos. La utilización de un convertor analógico digital de alta resolución (24 bits) con dos canales de entrada de alta impedancia permite medir la resistencia  $R_t$  sin que influyan las resistencias de los cables  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  y  $L4$ . Se utiliza una resistencia  $R_0$  para obtener la tensión de referencia del convertor analógico digital

### Termómetro de semiconductor

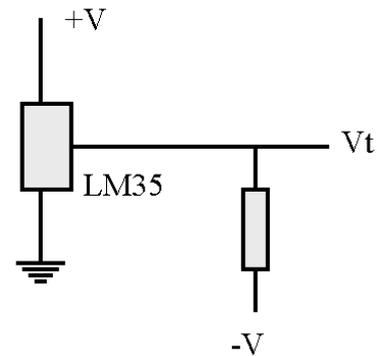
Existen actualmente en el mercado multitud de sensores de temperatura basados en el empleo de semiconductores. Desde los simples elementos de tipo resistivo, conocidos como *termistores* que poseen grandes coeficientes de temperatura positiva (PTC) o negativa (NTC) y que son los más utilizados, hasta sofisticados circuitos integrados que ofrecen unas excelentes características y que también incluyen en su interior la circuitería necesaria para la transmisión a distancia de la información.



**Figura 8-13.** El AD590 es un sensor de temperatura que se comporta como un generador de corriente. Para obtener una tensión proporcional a la temperatura se debe utilizar una resistencia  $R$  en serie.

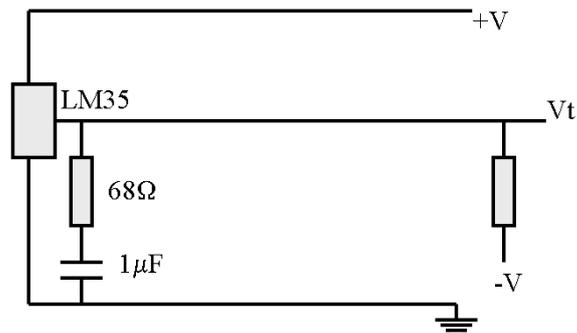
Los elementos de tipo termistor deben utilizarse con suma precaución, pues presentan importantes fenómenos de histéresis cuando son sometidos a choques térmicos. Sin embargo, si se utilizan en un margen estrecho de temperatura presentan la mayor resolución obtenible, alcanzándose, con las debidas precauciones y con el adecuado proceso de análisis de datos, poner de manifiesto fenómenos del orden de  $1 \mu\text{K}$ . Es importante cuidar, con este tipo de sensores, que la disipación térmica en el mismo no falsee la medida, esto es en ocasiones muy difícil de conseguir, pues la conductividad térmica de la roca es muy pequeña y por ello la resistencia térmica de contacto va a resultar siempre muy grande. Estudiando la variación de la temperatura indicada por el sensor en función del tiempo transcurrido desde que se ha conectado, puede servir de indicador de la calidad del sistema: si la temperatura aumenta con el tiempo cada vez que se conecta la alimentación se está en un caso de elevada resistencia de contacto y excesiva disipación en el sensor.

**Figura 8-14.** El LM35 se comporta como un generador de tensión, proporcionando directamente un voltaje de  $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . Para su utilización a temperaturas bajo cero debe polarizarse utilizando una fuente negativa y una resistencia de forma que la corriente sea del orden de  $50 \mu\text{A}$ .



Actualmente, los sensores más utilizados son aquellos que incorporan en su interior la propia electrónica capaz de excitar directamente un equipo de medida o de acoplarse al sistema de adquisición de datos o de telemetría. Los elementos más utilizados son del tipo fuente de corriente AD590 o fuente de tensión como el LM35, LM34, LM135, ambos estándar industrial y por ello de bajo costo. El AD590 funciona como fuente de corriente y para su operación precisa solamente de una fuente de alimentación y una resistencia (generalmente de  $1\text{K}\Omega$ ). En los extremos de la resistencia obtenemos una diferencia de potencial proporcional a la temperatura absoluta en K. Por el contrario, el LM35 nos da directamente la temperatura en  $^\circ\text{C}$ , el LM34 en  $^\circ\text{F}$  y el LM135 en K. El AD590 puede operar satisfactoriamente entre  $-55$  y  $+150^\circ\text{C}$ , con una sensibilidad de  $1\mu\text{A}/\text{K}$ . Este sensor se puede conseguir con una calibración en origen que garantiza un error y una falta de linealidad en toda la gama mejor de  $0.5\text{K}$ , aunque los modelos de bajo coste difícilmente mejoran  $1.5\text{K}$ . En estos casos es suficiente con ajustar la resistencia de carga hasta que a  $0^\circ\text{C}$  se obtengan  $273 \text{ mV}$ . El bajo coste y la facilidad de disposición hacen que este sea uno de los sensores más utilizados para la medida de temperatura, aunque ahora está siendo reemplazado por el LM35 que permite obtener directamente la temperatura en  $^\circ\text{C}$ .

**Figura 8-15.** La utilización de cables largos puede provocar la aparición de oscilaciones. Una simple red RC es suficiente, en la mayoría de los casos, para cancelarla.



El circuito de aplicación es muy simple y al funcionar como fuente de corriente tolera bien grandes longitudes de cable sin problemas de oscilaciones o aumento considerable de ruido. Esta cualidad, junto con requerir sólo dos conductores para su utilización hace que este componente sea todavía hoy favorito entre los diseñadores de redes termométricas para bajas temperaturas. Igualmente acepta bien la utilización de circuitos multiplexores de bajo costo, pues al trabajar en modo fuente de corriente compensa bien las fluctuaciones de resistencias de conducción de estos dispositivos. La tensión de alimentación debe estar comprendida entre 4 y 30V, operando normalmente con 12V.

El LM35 es un pequeño circuito integrado que proporciona a su salida una tensión proporcional ( $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ ) a la temperatura centígrada de la cápsula. El dispositivo viene bien calibrado de origen, por lo que en la mayoría de aplicaciones, puede utilizarse directamente sin necesidad de incluir elementos de ajuste. Cuando se desea poder medir temperaturas por debajo de  $0^\circ\text{C}$  es necesario polarizar negativamente la salida incluyendo una resistencia conectada a una fuente negativa. El valor de esta resistencia es de  $-V_s/50\mu\text{A}$ , aunque debe adaptarse a la impedancia del dispositivo de medida que se utilice. Cuando se utilizan cables largos debe disponerse una red RC para estabilizar el circuito y evitar oscilaciones Conectando la salida del sensor a un conversor de alta resolución (24 bits) o un conversor tensión frecuencia es posible seguir las variaciones de temperatura de un acuífero o de la roca, pudiéndose discriminar variaciones en temperatura del orden de  $10^{-5}^\circ\text{C}$ . Esta elevada resolución se obtiene gracias a que todo el dispositivo, sensor y conversor se encuentran a la misma temperatura, y además, ésta varía muy poco, por lo que los efectos de histéresis son despreciables.

### **Vigilancia visual de volcanes**

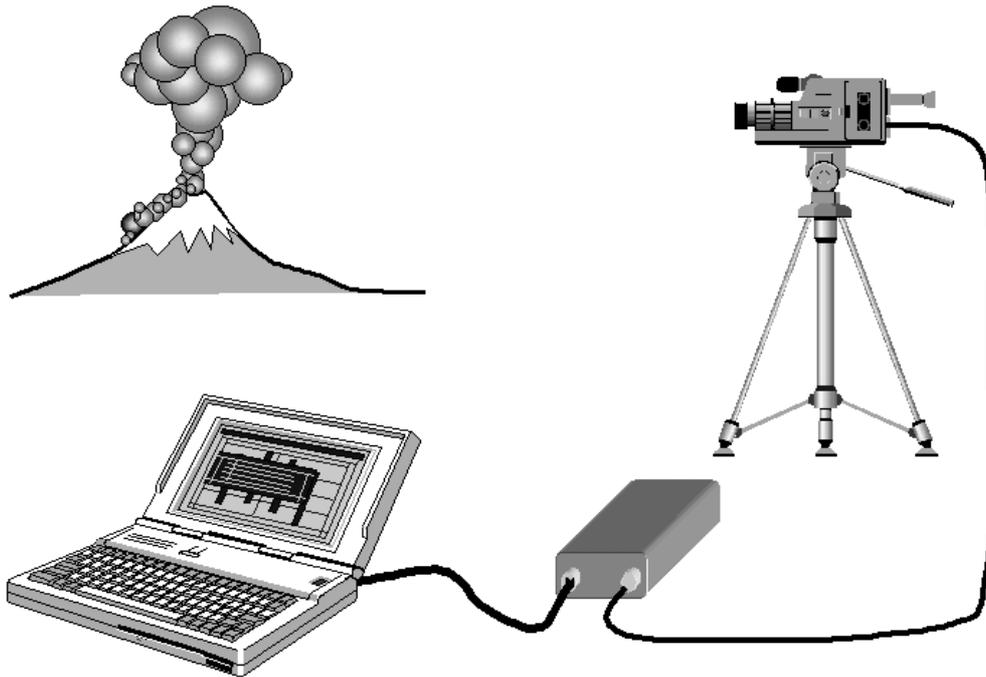
La vigilancia visual de volcanes es evidentemente la forma más antigua para el seguimiento de la actividad volcánica. Los primeros observatorios se construían cerca de los volcanes activos para poder mantener una vigilancia visual del volcán, seguidamente en estos mismos observatorios se instalan los primeros instrumentos cuyo desarrollo posterior condujo a la propia desaparición del observatorio tradicional. Sin embargo no se abandona el seguimiento visual de la actividad volcánica, siendo ahora encomendada a personas que habitan cerca del volcán y cuyos informes son básicos para poder interpretar los registros aportados por los instrumentos. La aparición de las cámaras de vídeo ha permitido desarrollar técnicas para poder realizar en forma remota el seguimiento visual de la actividad volcánica.

### **Aplicación de una cámara de vídeo**

En principio, no es difícil instalar una cámara de vídeo para disponer de una imagen de la actividad volcánica, sin embargo en la práctica la cosa cambia, pues se debe almacenar un gran volumen de imágenes, de las que sólo unas pocas tienen interés. Además se deberá utilizar un enlace telemétrico para poder recibir las imágenes en el centro de vigilancia. Una solución es utilizar los métodos convencionales: enlace de vídeo y almacenamiento en cinta magnética. Los enlaces de vídeo requieren una potencia considerable y el coste de propiedad y operación es elevado. La utilización de registro en cinta magnética es más simple, pues se utiliza masivamente en sistemas de

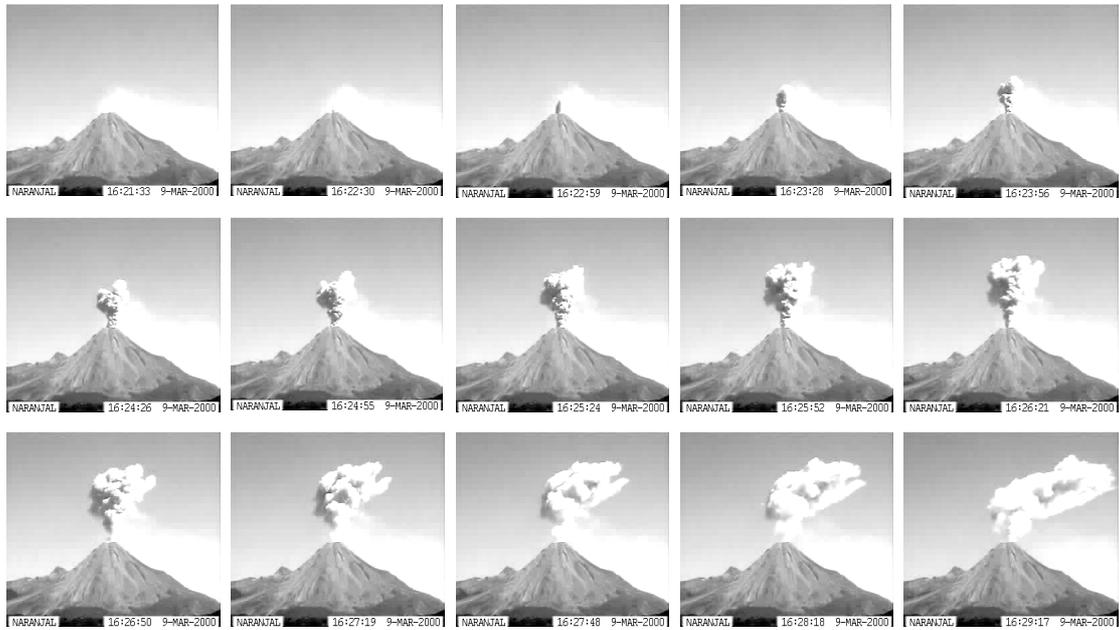
seguridad, aunque su almacenaje y análisis no son sencillos. La mejor solución es utilizar un sistema de registro de vídeo en un computador. Hoy existen múltiples sistemas que permiten adaptar una cámara de vídeo a un computador y casi todos ellos pueden utilizarse, aunque es necesario que satisfagan las siguientes condiciones:

- Posibilidad de utilizar una cámara de alta calidad.
- Capacidad para operar en modo imagen a imagen.
- Detección automática de movimiento.
- Resolución variable.



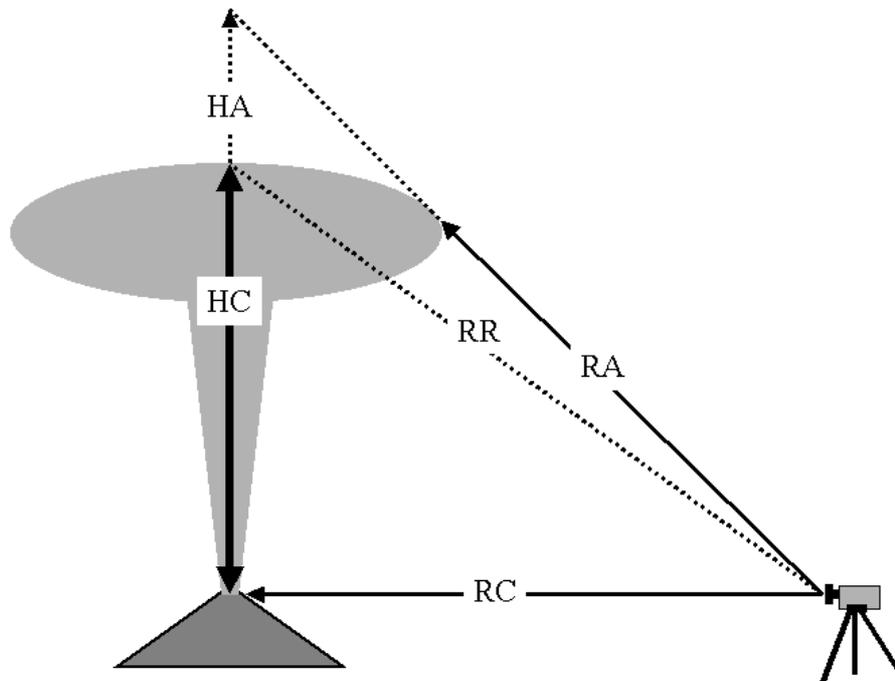
**Figura 8-16.** La instalación de una cámara de vídeo para el seguimiento visual de la actividad volcánica es muy sencilla: es suficiente con disponer de un adaptador que permita conectar una cámara de calidad a un computador.

En general la cámara habrá que disponerla a considerable distancia del volcán, por lo que deberemos poder disponer de una óptica variable y de alta calidad, aún en el caso de utilizar baja resolución. Es necesario poder operar en modos de baja velocidad, por ejemplo una imagen por minuto o menor. La detección automática de movimiento permite activar la adquisición de imágenes en el momento en que se produzca una explosión. La resolución variable es importante para disminuir el volumen de imágenes a almacenar, en general es suficiente una resolución de 320x240 o menor. Con esta resolución cada imagen en formato JPG es del orden de 15 a 30 KB, lo cual supone más de 1 MB por hora. La capacidad actual de los discos es suficiente para almacenar varios meses de imágenes. El acceso telefónico o a través de Internet permite el análisis de series limitadas de imágenes. Cuando se dispone de un acceso de velocidad media (56.000 baudios) es posible transmitir directamente la señal de video utilizando cualquier algoritmo de compresión. En este caso, se puede mantener un registro continuo de varios días de duración y hacer extracciones periódicas o de los eventos interesantes.



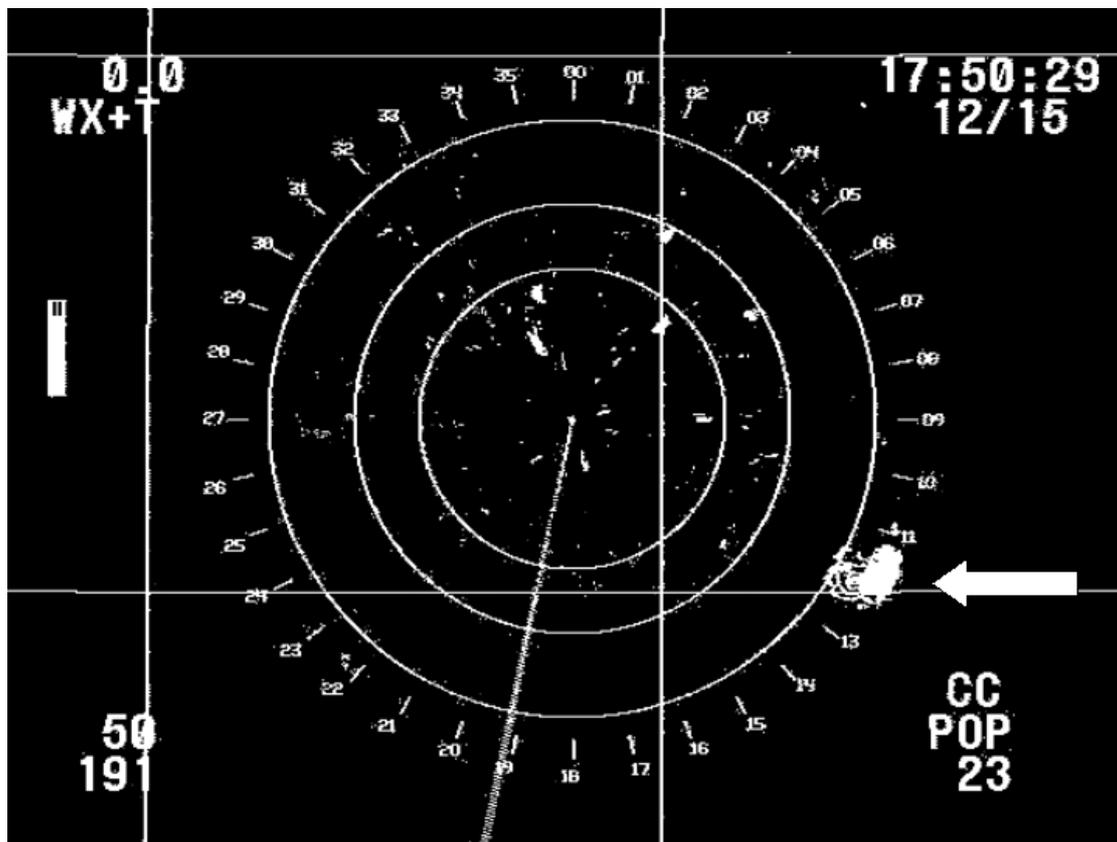
**Figura 8-17.** Secuencia de imágenes de una explosión en el volcán Fuego de Colima (México) obtenidas mediante un sistema de baja resolución operando a 3 imágenes por minuto. Cortesía del Observatorio Volcanológico de la Universidad de Colima.

Es preferible adoptar un adaptador de vídeo externo y dotado de una conexión USB, para poder operar con computadores portátiles. Esta opción es muy importante cuando hay que atender una crisis en una zona rural donde difícilmente se pueda garantizar el suministro energético. Esta configuración, cámara-adaptador-USB-computador, puede operar en forma autónoma, alimentada con paneles solares y transmitir una o dos imágenes de 320x240 por minuto mediante un enlace digital de 9600 baudios.



**Figura 8-18.** La altura de la columna eruptiva HC es muy frecuente que esté sobreestimada, pues se calcula a partir del rayo RA que corresponde a una altura aparente HA. La utilización de varias cámaras permite corregir este efecto.

Siempre que sea posible, para el seguimiento en imágenes de la actividad de un volcán explosivo es conveniente disponer de varias cámaras para poder así reconstruir adecuadamente la evolución de la columna eruptiva. En muchos casos, dos cámaras sincronizadas separadas unas pocas decenas de metros ya proporciona un par estereoscópico de suficiente calidad. En este mismo sentido, es importante conocer en cada momento a que distancia está situada la cámara del volcán y la focal de la óptica que está trabajando. Un error muy frecuente que conduce a la sobreestima de la altura de la columna se debe a que se interpreta la imagen de la explosión como si toda ella estuviera en un plano, y no se tiene en cuenta el importante desarrollo horizontal que alcanza cuando se desarrolla el clásico hongo. La única forma de corregir este efecto es disponer de distintas imágenes simultáneas (es suficiente una sincronización de unos pocos segundos) tomadas desde distintos puntos.

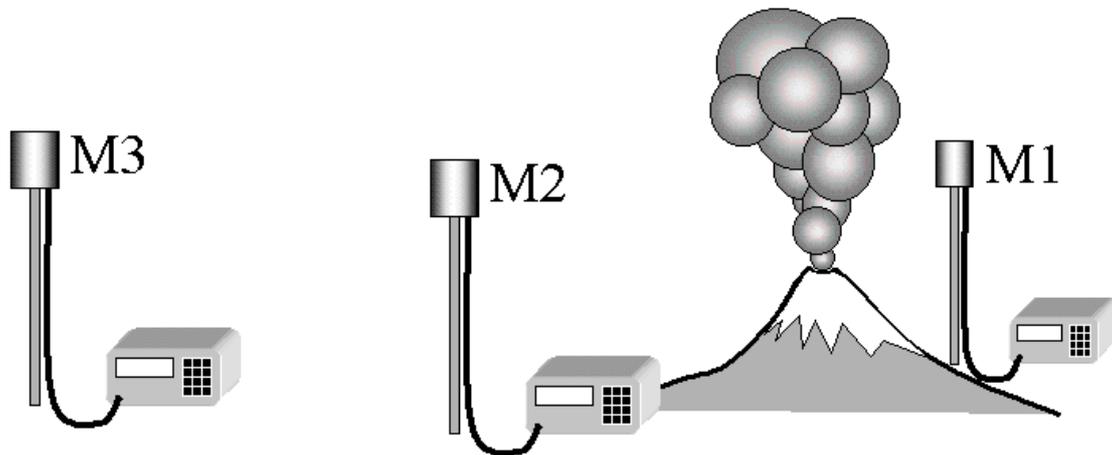


**Figura 8-19.** La flecha señala una emisión de cenizas en el volcán mexicano Popocatepetl obtenida mediante una imagen radar. Cortesía CENAPRED (México)

Estas mismas técnicas también pueden adaptarse para transmitir otro tipo de imágenes, por ejemplo una imagen infrarroja, un intensificador de imagen para visión nocturna o una imagen radar, sin embargo, mientras que no supone ningún problema la adquisición de una cámara de vídeo de gran calidad, una cámara infrarroja y, especialmente el sistema de radar, suponen ya inversiones muy considerables, que sólo están justificadas en volcanes en actividad y que supongan un peligro muy inmediato como puede ser la caída de cenizas en un aeropuerto.

## Métodos electromagnéticos

La aplicación de métodos electromagnéticos para el seguimiento de la actividad volcánica ha alcanzado un gran desarrollo en estos últimos años, aunque su implementación se limita a un número escaso de volcanes. Las técnicas usuales son el estudio de las variaciones del campo magnético, del potencial espontáneo y la resistividad. Estas técnicas también se están ensayando como precursores sísmicos.

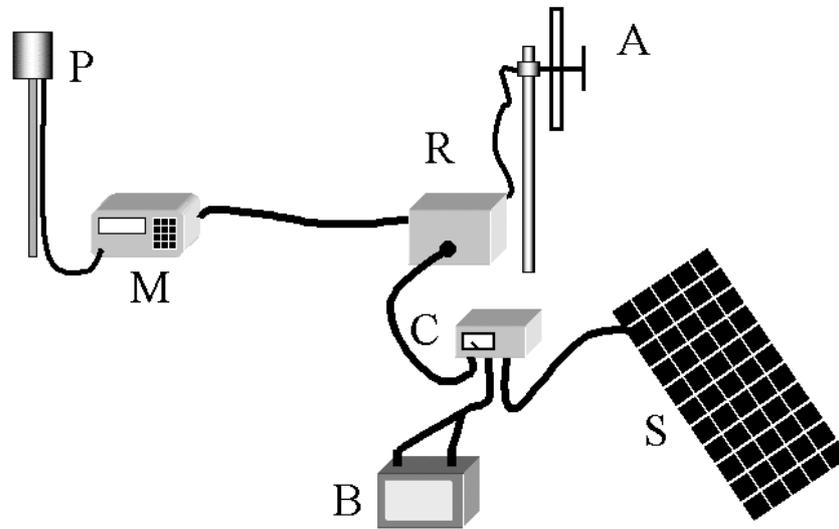


**Figura 8-20.** Para el estudio de los fenómenos volcánico-magnéticos debe disponerse al menos de tres magnetómetros sincronizados en tiempo y con resolución de 1 nanotesla. Deben estar situados dos sobre la zona activa y el tercero, que sirve de referencia, a pocos kilómetros.

## Campo magnético

Para el estudio de las variaciones del campo magnético producidas por la actividad volcánica se utiliza una red de magnetómetros de protones sincronizados en tiempo. De esta forma es posible por simple diferencia cancelar las perturbaciones debidas a otras causas. La sincronización en tiempo no es difícil si se utilizan sistemas de telemetría en tiempo real o una sincronización mediante receptores GPS en sistemas que operen en tiempo diferido. La mayor dificultad para implementar un dispositivo de este tipo es la necesidad de conseguir una resolución mejor a 1 nanotesla, ya que la amplitud de las señales volcánico-magnéticas es muy pequeña. Esto exige instalar los magnetómetros en puntos donde el gradiente del campo magnético sea pequeño, lo cual es muy difícil de conseguir en volcanes activos debido al carácter fuertemente magnético de los materiales volcánicos. También es importante cuidar otros efectos, por ejemplo, debe evitarse la acumulación de cenizas ya que estas son magnéticas y pueden provocar la aparición de falsas anomalías. Igualmente ocurre con los dispositivos complementarios de la estación magnética, como son los paneles solares, las baterías y en general todo el conexionado por el que circulen corrientes importantes. Hay que prestar especial atención al sistema de telemetría que no debe transmitir cuando el magnetómetro está realizando la medida ya que interfiere. Nunca deberá situarse un magnetómetro en las proximidades de una estación sísmica ya que los geófonos van provistos de potentes imanes y los sistemas de telemetría utilizados transmiten en modo continuo. Si se desea utilizar el mismo enlace (o instalaciones) de la red sísmica para desplegar los sensores magnéticos la única solución es separar el magnetómetro (sensor y electrónica) unas

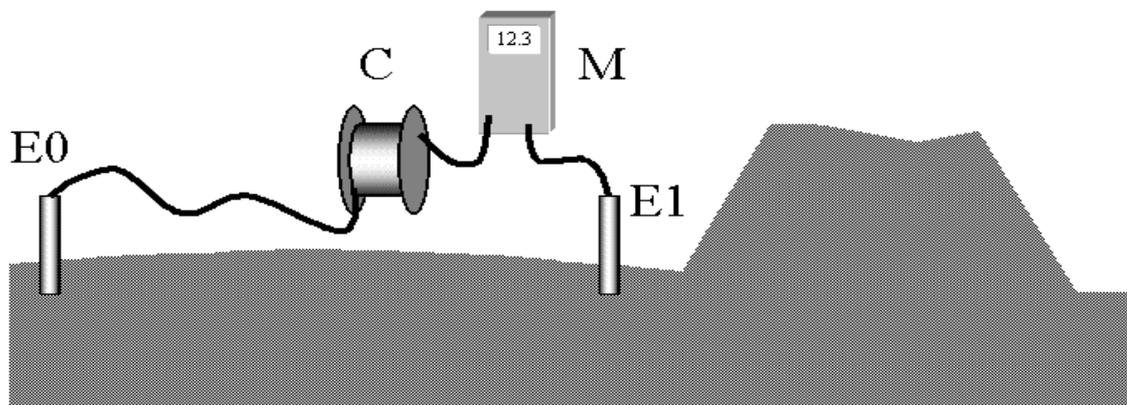
decenas de metros, utilizando un enlace de telemetría por cable. La distancia mínima debe determinarse experimentalmente.



**Figura 8-21.** La instalación de una estación magnética debe cuidar especialmente que no se produzcan interferencia con los elementos auxiliares. El sensor P y la electrónica M deben situarse alejados del resto del sistema, especialmente del transmisor de radio R y de la antena A. La alimentación se obtiene mediante un panel solar S que carga una batería B a través de un regulador C. Es importante que la tensión que llega al magnetómetro esté dentro de los límites marcados por el fabricante y presente las menores fluctuaciones posibles.

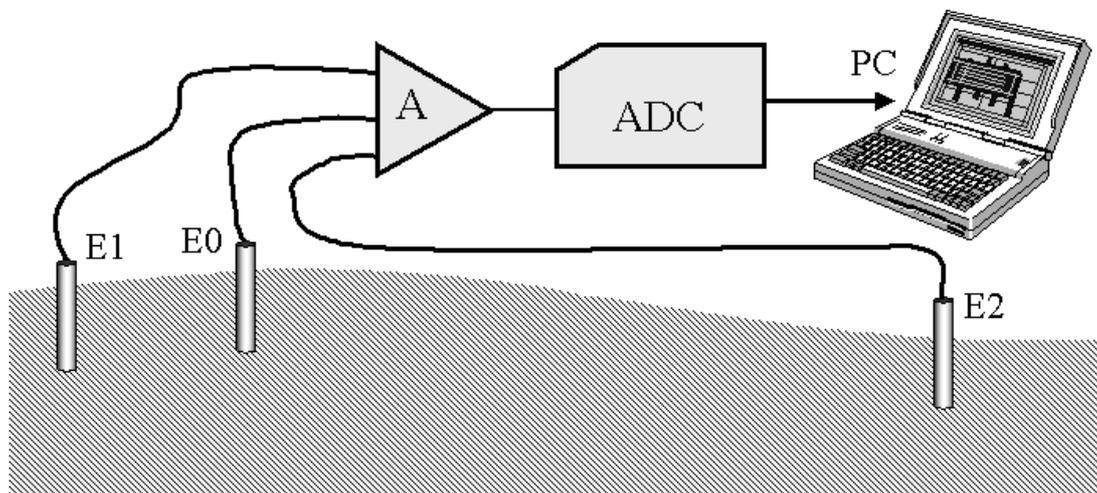
### Potencial espontáneo

El estudio del potencial espontáneo en volcanes activos presenta dos vertientes, por una parte la realización de mapas de anomalías de potencial, que reflejan mayoritariamente el sistema de fracturas por donde circulan fluidos. Por otra, el estudio de las fluctuaciones de potencial relacionadas con cambios en el sistema volcánico.

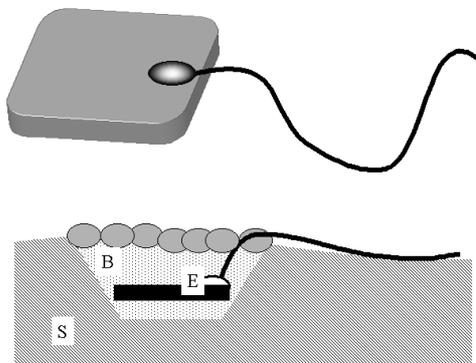


**Figura 8-22.** El estudio de la distribución de anomalías de potencial espontáneo es muy sencilla: consiste en situar un electrodo fijo de referencia E0 y desplazar un segundo electrodo E1 a lo largo de un itinerario, realizando una lectura con un milivoltímetro M cada 100 m. Se utiliza un carrete con hilo de cobre esmaltado C para mantener la conexión con el electrodo de referencia.

Para la realización de mapas de potencial la técnica más habitual consiste en realizar itinerarios, situando un electrodo de referencia en un punto fijo y desplazando el segundo electrodo. Para ello se utiliza un cable de muy bajo coste (como puede ser hilo de cobre esmaltado con diámetro de pocas décimas de milímetro), ya que en general resulta imposible recogerlo y volverlo a utilizar. Al desplegar el cable se debe evitar que se rompa, pues son hilos muy débiles. Teniendo presente el bajo coste del hilo, se suelta de modo que quede siempre holgado. Como electrodos suelen utilizarse electrodos impolarizables, como puede ser el clásico electrodo de cobre, en una disolución saturada de sulfato de cobre dispuestos en un vaso poroso. Otro electrodo de gran calidad es el que utiliza una barra de cadmio en una disolución saturada de cloruro de cadmio, pero es altamente tóxico. Un electrodo que se comporta razonablemente bien, especialmente en áreas volcánicas activas donde las anomalías de potencial son grandes, es una simple placa de plomo.



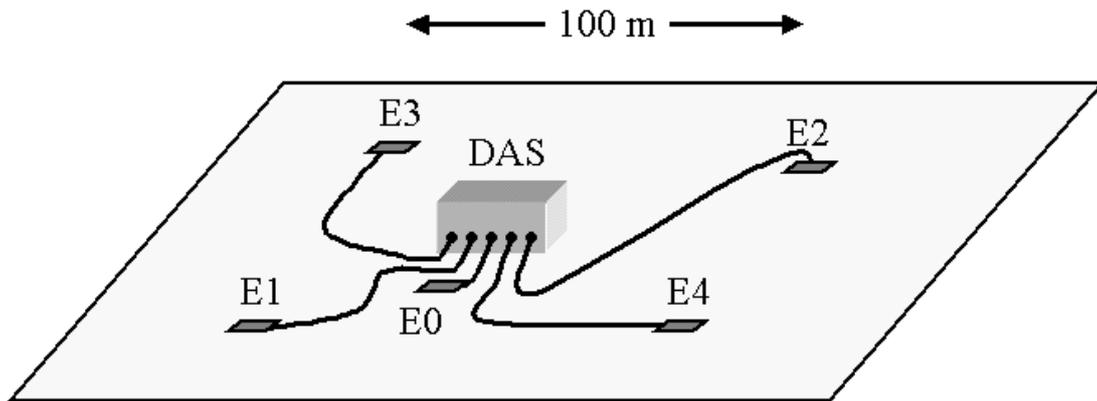
**Figura 8-23.** El estudio de las variaciones de potencial requiere un par de electrodos fijos (E1 y E2), conectados a un amplificador diferencial (A), un convertor analógico digital (ADC) y un sistema de adquisición de datos (PC). Se suele incluir un electrodo de referencia (E0) para evitar diferencias de potencial entre la masa del sistema de adquisición de datos y tierra



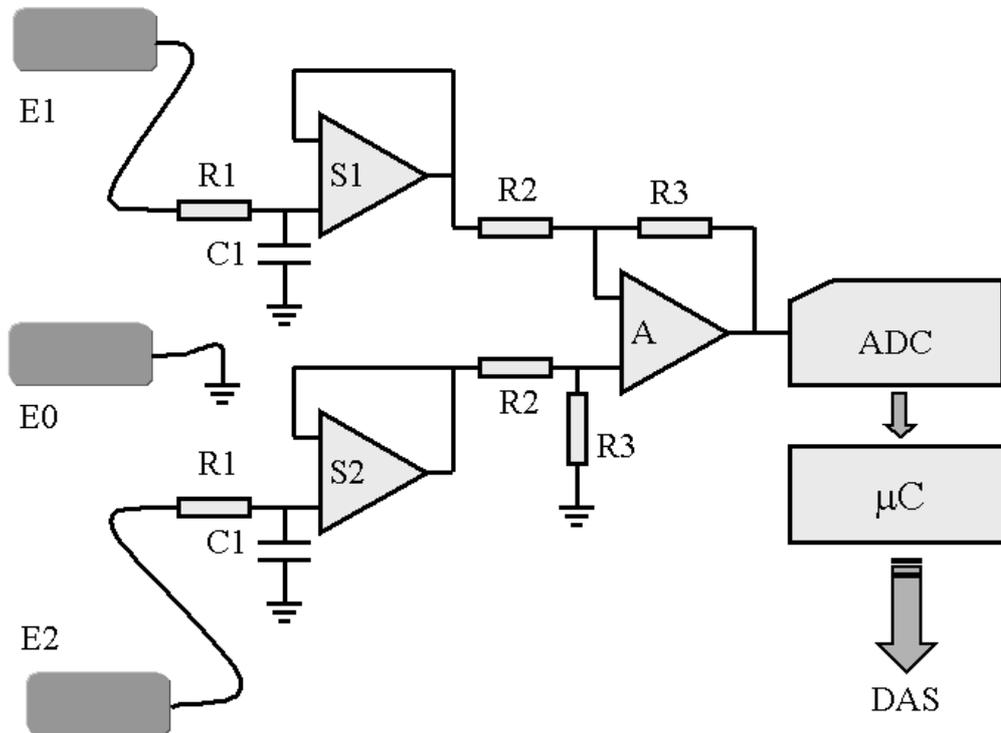
**Figura 8-24.** En general se utilizan electrodos de plomo, contruidos con una placa de plomo de 5cm x 5cm. El electrodo (E) se entierra en un hueco realizado en el suelo (S) que se rellena con un lodo de bentonita, de esta forma se mejora el contacto. Se utiliza bentonita, pues al ser fuertemente higroscópica, mantiene un alto contenido en agua, incluso en condiciones grandes de sequedad.

La medida se realiza mediante un milivoltímetro de alta impedancia de entrada, con un filtro de radiofrecuencia (una simple autoinducción y dos condensadores) a la entrada

para evitar posibles interferencias por las emisoras de radio o las líneas de distribución de energía eléctrica. Una sensibilidad de 0.1 milivoltios es suficiente. La situación de los puntos se obtiene mediante un GPS. En general es suficiente con tomar un punto cada 100 m, aunque en algunos casos debe reducirse esta distancia para mejorar la definición de las zonas anómalas. Hay que tomar especiales precauciones cuando se realizan estos estudios en Parques Nacionales y áreas protegidas para provocar el menor impacto posible, por lo que, además de recoger el hilo, deberá cuidarse la implantación de los electrodos.



**Figura 8-25.** El dispositivo más utilizado consta de dos líneas ortogonales de electrodos (E1, E2 y E3, E4) con un único electrodo de referencia E0 y el mismo sistema de adquisición de datos.

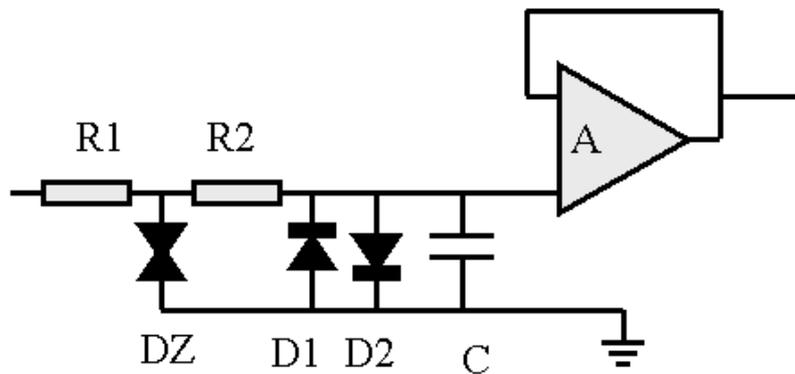


**Figura 8-26.** Amplificador diferencial para el estudio de variaciones de potencial espontáneo. Se utiliza un montaje convencional, los electrodos de medida (E1 y E2) se conectan a través de dos filtros RC pasabajos ( $R1C1$ ) a dos amplificadores montados como seguidor (S1 y S2). La salida de éstos va a un amplificador diferencial (A). Los pares de resistencias R2 y R3 permiten variar la ganancia del circuito ( $R3/R2$ ). A la salida se dispone el convertor analógico digital ADC. Un microcontrolador ( $\mu C$ ) prepara la

secuencia de datos en el formato requerido por el sistema de adquisición (DAS). El electrodo de referencia (E0) se conecta a la tierra del circuito.

### Variaciones de potencial

Consiste en estudiar las variaciones del potencial espontáneo en una determinada zona. Para ello se disponen varios dispositivos formados por dos electrodos fijos, registrándose el potencial eléctrico entre ellos. En general se utilizan dispositivos en estrella, incorporando un electrodo central como referencia a todo el conjunto. Los electrodos son de plomo, pues es muy difícil mantener electrodos imporalizables durante mucho tiempo. La distancia entre electrodos suele ser alrededor de 100 m, aunque depende de las condiciones particulares de cada emplazamiento.

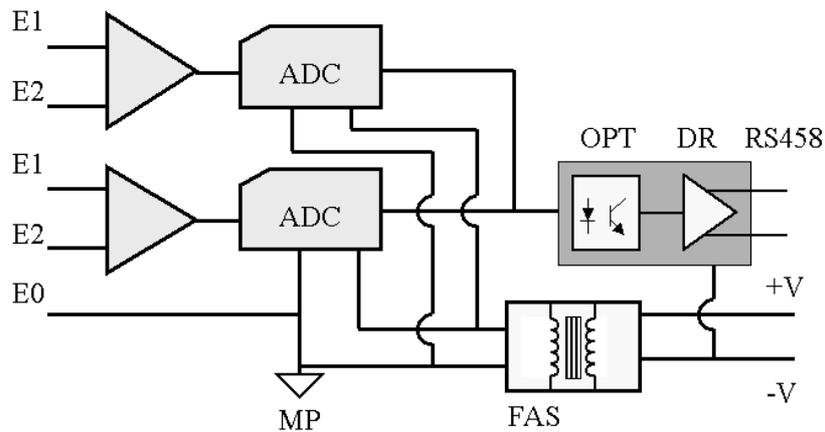


**Figura 8-27.** El circuito de cada una de las entradas se protege mediante una resistencia de bajo valor (100  $\Omega$ ) y dispositivo semiconductor supresor de transitorios (DZ). Después sigue el filtro RC (R2,C) y directamente a la entrada del amplificador se disponen dos diodos de silicio (D1 y D2).

### Dispositivo electrónico

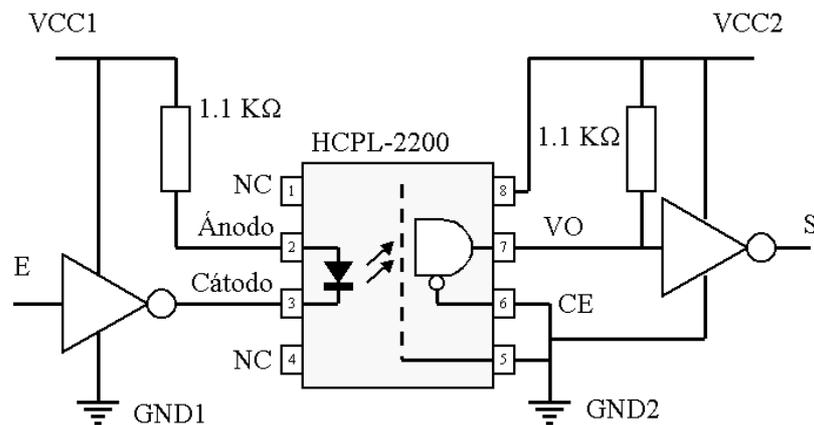
Para el registro de las variaciones del potencial espontáneo se requiere un amplificador diferencial de alta impedancia de entrada. En principio, no plantea ninguna dificultad el diseño de este amplificador, sin embargo hay que cuidar algunos detalles. El amplificador debe estar precedido por un filtro de radiofrecuencia para evitar que las líneas para la medida del potencial actúen como antenas para las emisoras de radiodifusión. También debe estar protegido contra transitorios de alta tensión, pues las líneas captan las inducciones provocadas por las caídas de rayos, provocando la destrucción del amplificador. Evidentemente, ninguna protección servirá ante la caída directa de un rayo, pero la mayor parte de daños en estos equipos se producen por efecto de rayos caídos a considerable distancia y éstos si pueden minimizarse.

Debe cuidarse el aislamiento de todos los elementos, las fugas de corriente pueden provocar la aparición de extrañas señales que se atribuyan a la actividad volcánica. La mejor solución es diseñar el sistema de electrodos y electrónica asociada totalmente aislados del sistema de adquisición de datos y alimentación de potencia. Para ello se pueden utilizar opto-acopladores para la transmisión de señales y fuentes conmutadas aisladas.



**Figura 8-28.** Se utilizan dos amplificadores diferenciales para la medida de los dos pares de electrodos (E1,E2 y E3,E4) disponiendo un conversor analógico digital y microcontrolador (ADC) para cada uno de ellos. La salida de datos se realiza por una única línea RS485 aislada mediante un optoacoplador (OPT) y un adaptador RS485 (DR). Una fuente conmutada (FAS) aislada alimenta el sistema. El electrodo de referencia E0 se conecta directamente a la masa (MP) del sistema analógico.

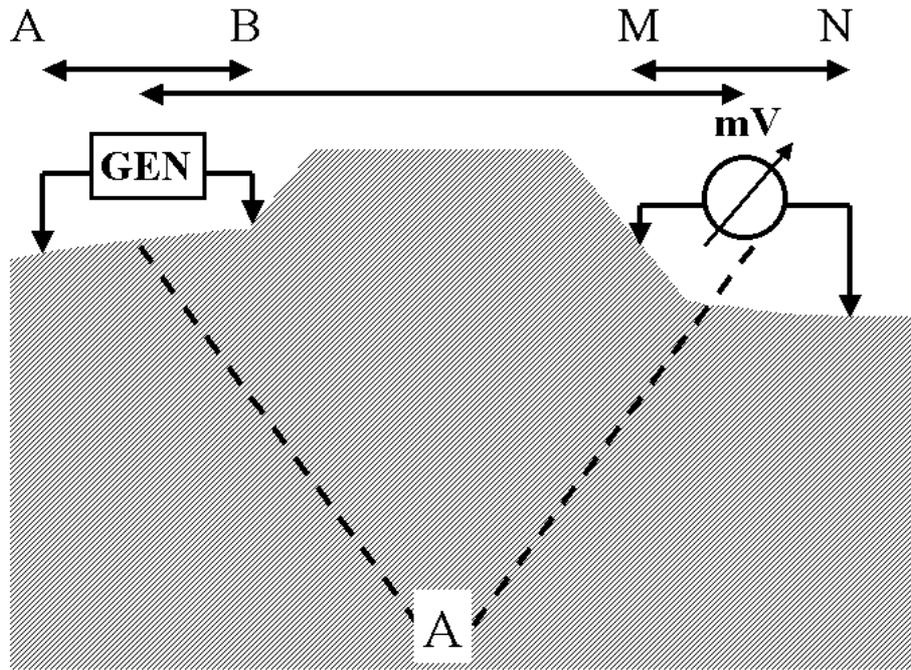
En muchos casos, estos sistemas se disponen cerca de otros instrumentos, integrándose todo ello en una estación multiparamétrica. En estos casos la energía eléctrica requerida por el sistema es ya relativamente considerable e inevitablemente se producen fugas a tierra que perturban las medidas del potencial. La solución consiste en alejar el dispositivo de medida del resto de sistemas, utilizar un sistema de alimentación aislado galvánicamente y transmitir los datos mediante telemetría cable.



**Figura 8-29.** Utilización de un optoaislador. Se ha elegido un optoaislador HCPL 2200 que permite velocidades de conmutación muy elevadas y ofrece un aislamiento galvánico superior a 600 V. El esquema muestra la interfase con circuitos CMOS.

### Medida de resistividades

La medida de resistividades utilizada es un dispositivo del tipo dipolo - dipolo, emplazando los dipolos emisor y receptor a ambos lados del volcán, de forma que el punto de atribución corresponda a la vertical de la zona activa. Lógicamente hay que utilizar dispositivos muy grandes y que requieren mucha potencia para poder obtener medidas significativas. Las experiencias de las que tenemos noticias, emplean dipolos emisor y receptor de dos kilómetros de longitud, separados otros dos kilómetros. En general se suelen disponer varios dispositivos, ya que el coste más importante lo constituye el generador.



**Figura 8-30.** Dispositivo dipolo – dipolo para la medida de resistividades. Se utiliza un generador de corriente continua o conmutada a muy baja frecuencia (GEN) que inyecta la corriente mediante un par de electrodos separados del orden de 2 Km. Simétricamente y al otro lado del volcán se dispone otro par de electrodos, con la misma separación y conectados a un milivoltímetro. La resistividad, calculada dividiendo el potencial obtenido por la corriente inyectada e introduciendo un factor geométrico se asigna a un punto de atribución situado donde se cortan dos rectas a 45° (líneas de trazos). La potencia requerida suele ser de varios kilovatios. Se ha utilizado la nomenclatura clásica del sondeo eléctrico (A, B, M, N) para identificar los distintos electrodos.

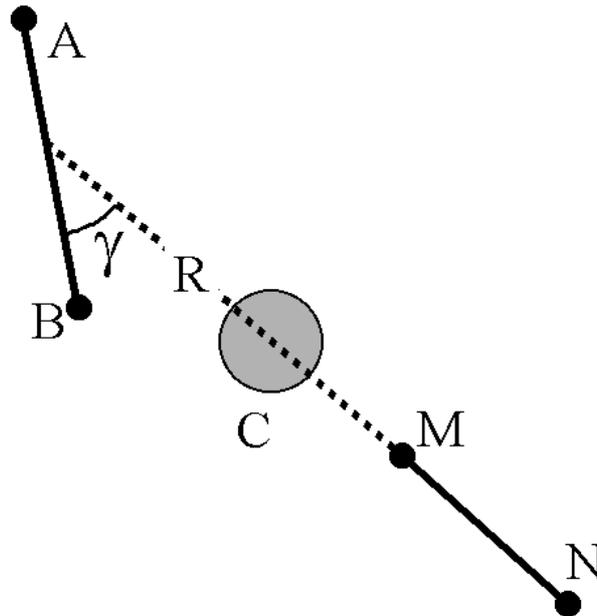
La resistividad  $\rho$  para un dispositivo dipolo – dipolo viene dada por :

$$\rho = K \frac{\delta V}{i}$$

donde  $K$  es un factor geométrico que para el caso de un dispositivo axial (ambos dipolos están en línea recta) es:

$$K = \frac{\pi R^3}{AB MN}$$

siendo R la distancia entre centros de los dos dipolos, AB la separación de los electrodos de corriente y MN la correspondiente a los electrodos de potencial.



**Figura 8-31.** Alinear los dos dipolos entre sí (AB y MN) y con el centro activo (C) es una labor casi imposible de realizar en las laderas de un volcán activo. Una solución de compromiso consiste en alinear los centros de los dipolos, pero permitiendo que uno de ellos esté desalineado un ángulo  $\gamma$ .

En la práctica resulta poco menos que imposible situar sobre un volcán dos dispositivos de estas características alineados. Una posibilidad es alinear los dos centros de los dipolos con el centro del volcán, pero permitiendo que uno de los dipolos no lo esté. En este caso la constante geométrica viene dada por:

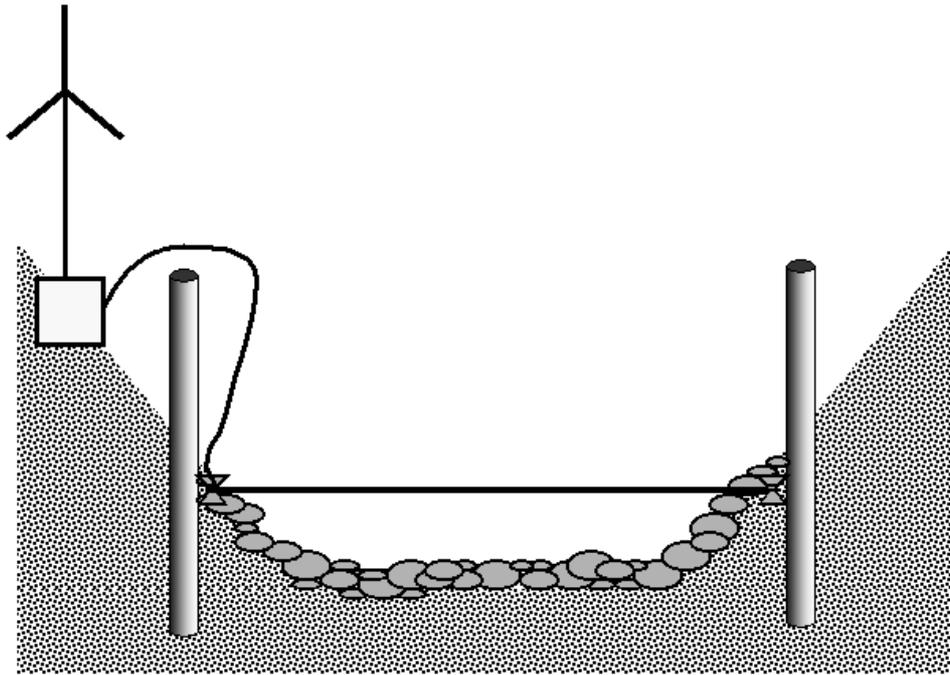
$$K = \frac{\pi R^3}{AB MN \cos \gamma}$$

en donde aparece el coseno del ángulo  $\gamma$ . De acuerdo con esto deben evitarse ángulos muy grandes en las que K toma valores muy elevados lo que equivale a una pérdida de sensibilidad del dispositivo.

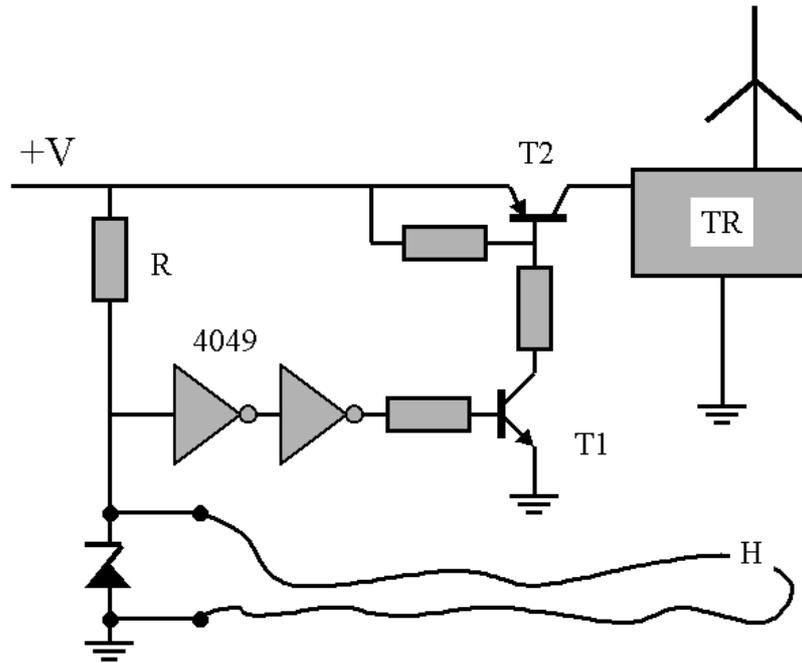
### Detección de lahares.

Los lahares, aluvión de materiales volcánicos fluidizados por agua, constituyen uno de los más importantes factores de riesgo en un área volcánica activa. De hecho, el mayor

número de víctimas mortales producidas por la actividad volcánica se debe a los lahares. Por este motivo se ha tratado de desarrollar modelos teóricos que permitan pronosticar cuando se puede producir un lahar y especialmente técnicas de vigilancia que avisen del momento en el que un lahar ha iniciado su descenso por las laderas del volcán. La detección de la ocurrencia de un lahar parte del principio que los lahares transcurren por los cauces que conducen de la parte alta del volcán hacia los valles situados en las zonas bajas y donde se acumula la población. Además, el agua necesaria para la fluidización de los materiales (cenizas en su mayor parte) procede de los glaciares situados en las zonas altas (lahares primarios) o proveniente de fuertes lluvias (lahares secundarios)

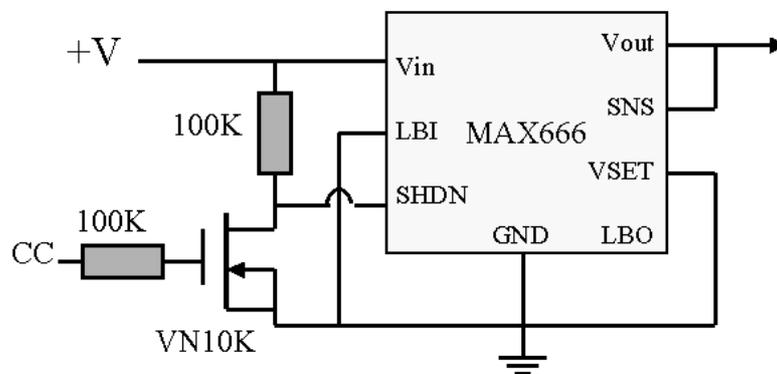


**Figura 8-32.** Al descender un lahar rompe el hilo y se transmite una señal de radio.

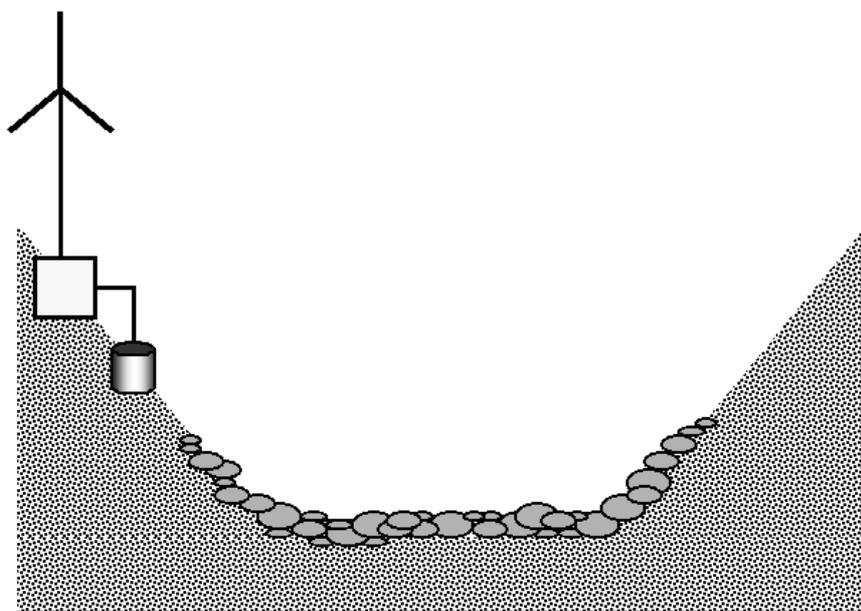


**Figura 8-33.** Al romperse el conductor (H) el inversor 4049 cambia de nivel, pasando a conducción los transistores T1 y T2, con lo que el transmisor empieza a transmitir. El consumo en reposo es muy pequeño, pues prácticamente está determinado por R1. Es necesario llegar a un compromiso entre el consumo ( $R \gg$ ) y la inmunidad ante posibles fugas de corriente ( $R \ll$ ) por ejemplo debidas a la presencia de agua. Se ha dispuesto un diodo (TRANSZORB) para prevenir transitorios de alta tensión.

Una de las técnicas más antiguas consiste en disponer cables que crucen los cauces, de forma que al transcurrir un lahar los rompa, interrumpiendo un circuito que produce la emisión de una señal de radio. El mayor problema es la necesidad de reponer los hilos, ya que también pueden romperse por otras causas (por ejemplo animales). La utilización de barras conductoras muy gruesas disminuye la posibilidad de roturas accidentales. El lahar posee suficiente energía para romper cualquier barra que se cruce en su camino. El consumo del sistema es mínimo, pues sólo transmite cuando se rompe el conductor, un sistema de pilas de litio puede garantizar la operación durante más de un año. Un factor a tener en cuenta es poder controlar que el sistema funciona correctamente, por ello es conveniente tener un dispositivo que transmita periódicamente una señal de test.

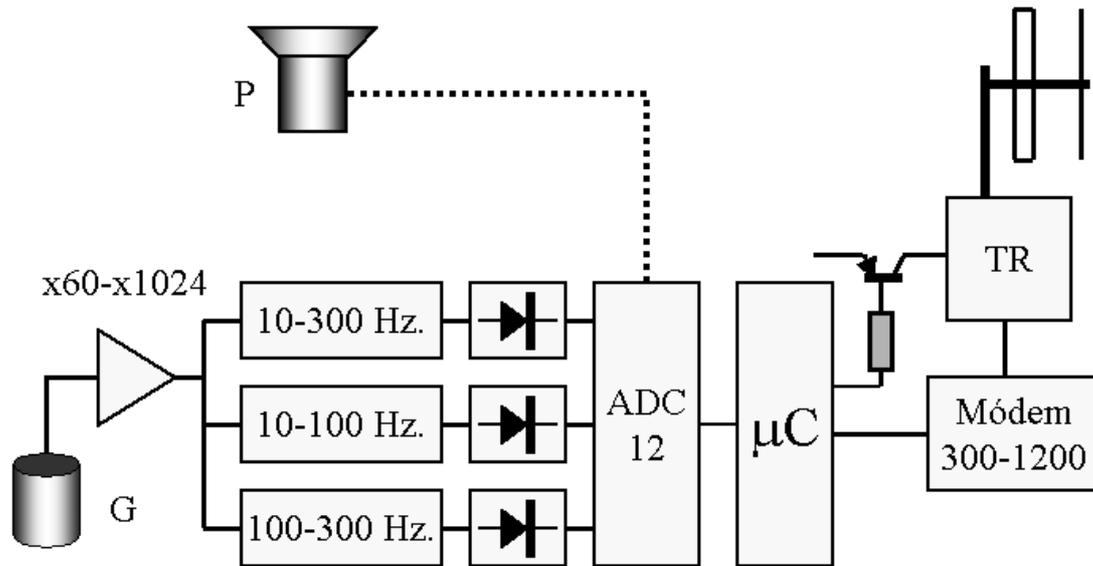


**Figura 8-34.** Algunas fuentes de alimentación, como MAX666, disponen de una conexión para poder conmutar la operación de la fuente, simplificando el diseño y generalmente proporcionando consumos en reposo extremadamente bajos.



**Figura 8-35.** Otro sistema consiste en estudiar el ruido sísmico producido por el paso del lahar.

Otra solución, bastante más complicada ha sido desarrollada por el US Geological Survey y consiste en disponer una serie de estaciones sísmicas de alta frecuencia en las proximidades de los cauces. El ruido generado por el paso del lahar es fácilmente identificable. Este sistema, para ser eficaz, requiere transmisión en continuo de las señales recogidas por el sensor. También se puede integrar en una estación multiparamétrica (sísmica, deformación, gases, etc.) con la que comparte el enlace telemétrico, pues las necesidades de transmisión son pequeñas. La electrónica asociada es sencilla, consiste en un geófono de alta frecuencia (8 Hz), seguido de un amplificador y un sistema de filtros. No se requiere un convertor de altas prestaciones, es suficiente con utilizar un convertor de 12 bits multicanal para poder medir la amplitud media en cada banda que se transmite periódicamente al observatorio. Un microcontrolador gestiona la operación del convertor y la conexión - desconexión periódica del transmisor.

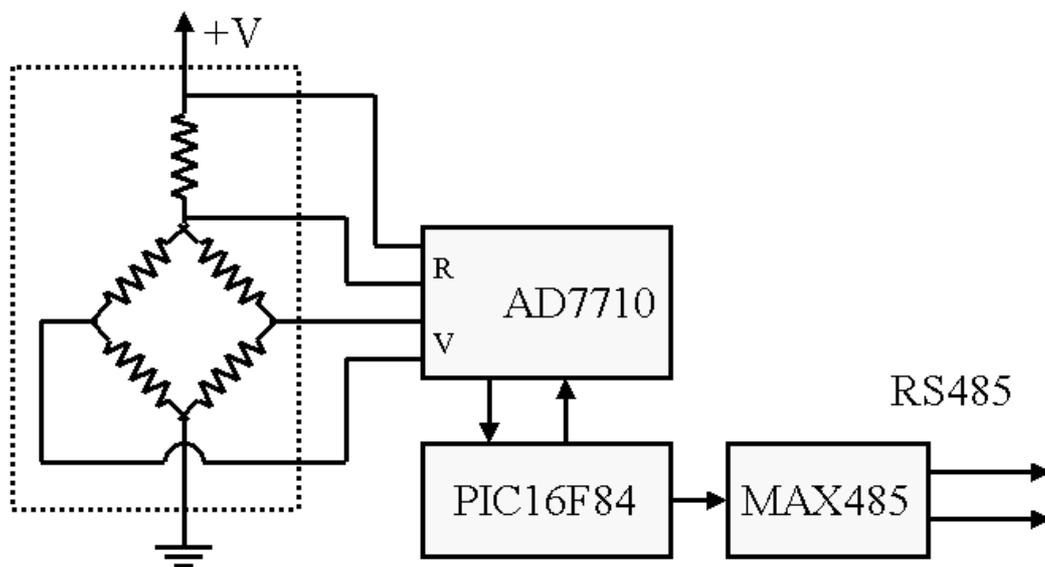


**Figura 8-36.** Diagrama bloque de la electrónica necesaria para detectar el paso de un lahar mediante el análisis de la señal sísmica producida. Se utilizan tres filtros para separar la señal en tres bandas, cuya amplitud se mide periódicamente mediante un convertor de 12 bits. Estas señales se transmiten mediante un transmisor convencional y un módem de baja velocidad.

En zonas donde el agua necesaria para desencadenar el lahar es de origen meteórico es conveniente disponer de un sistema de pluviómetros que avisen cuando en la parte alta del volcán se están produciendo precipitaciones excepcionales. Otra solución, utilizada en algunos volcanes japoneses, consiste en equipar los cauces con cámaras de vídeo que permiten la vigilancia visual de los posibles lahares. También se necesitan focos para poder iluminar la escena durante la noche. Esta solución es mucho más complicada que las anteriores, y precisa unos requerimientos de energía muy superiores, aún en el caso de que se utilicen sistemas de vídeo de baja resolución o simples detectores de movimiento.

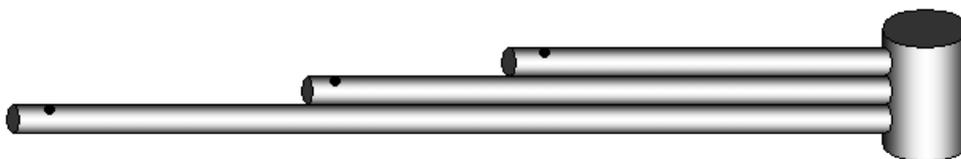
### Micro-barógrafo

Para el estudio de las ondas de presión y los infrasonidos asociados a las explosiones volcánicas se necesita un micro-barógrafo. Para ello se puede utilizar cualquier micrófono para infrasonidos disponibles en el mercado, aunque en la mayoría de los casos es suficiente con el empleo de un sensor de presión resistivo. Estos elementos son muy económicos y dan resultados muy satisfactorios, especialmente si están situados en zonas no demasiado agresivas. La utilización de un dispositivo de este tipo es muy sencilla, pues consiste en conectar directamente la salida del sensor a la entrada del convertor analógico digital y, si se encuentra disponible, la corriente de referencia a la entrada de tensión de referencia del convertor. En aquellos sensores que solo disponen de salida de presión, hay que utilizar la referencia interna del convertor, admitiendo que el sensor está internamente compensado en temperatura. Evidentemente, hay que utilizar sensores de presión del tipo absoluto. La resolución del convertor analógico digital es suficiente para poder analizar variaciones muy pequeñas de presión, especialmente a frecuencias inferiores a 10 Hz, donde se alcanzan fácilmente los 21 bits.



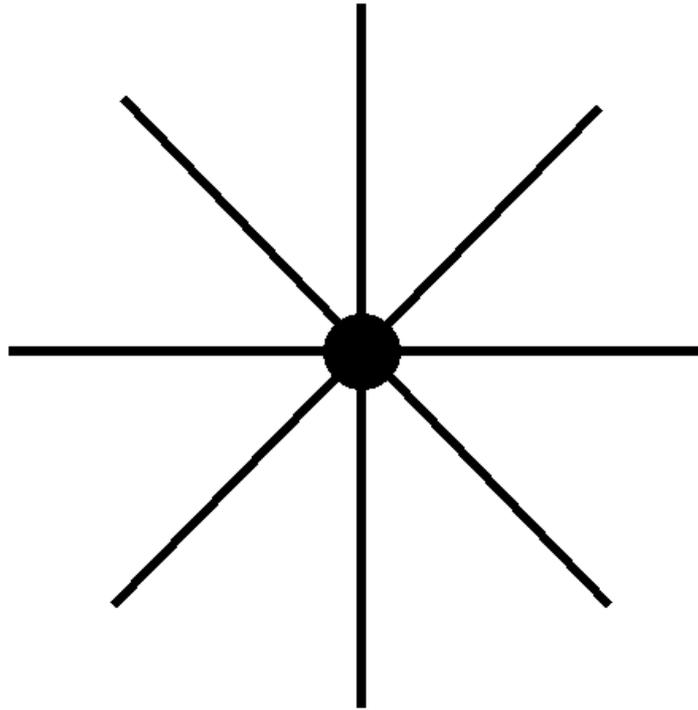
**Figura 8-37.** Circuito para la utilización de un sensor de presión como micro-barógrafo para el estudio de las ondas de presión producidas por las explosiones volcánicas.

Para el registro se pueden utilizar los mismos programas de sismica, teniendo presente que en general deberemos disponer de un filtro pasa altos para cancelar las variaciones lentas de presión. El viento es una causa de ruido muy importante. Una forma de mitigar sus efectos es disponer de una serie de tubos en forma de estrella, de modo que la presión medida por el sensor corresponda al valor medio de la presión en una amplia superficie.



**Figura 8-38.** Para reducir el ruido debido al viento se suele emplear una estrella de tubos de forma que en un volumen central se tenga el valor medio de la presión en cada un de los brazos.

Cada brazo está formado por varios tubos – un mínimo de tres – cuya única conexión con la atmósfera es mediante un agujero de dimensiones capilares. En el recipiente central se dispone el medidor de presión. Como siempre hay que evitar la suciedad y las condensaciones obstruyan los capilares que permiten que igualar la presión interior con la exterior en el extremo de cada brazo.

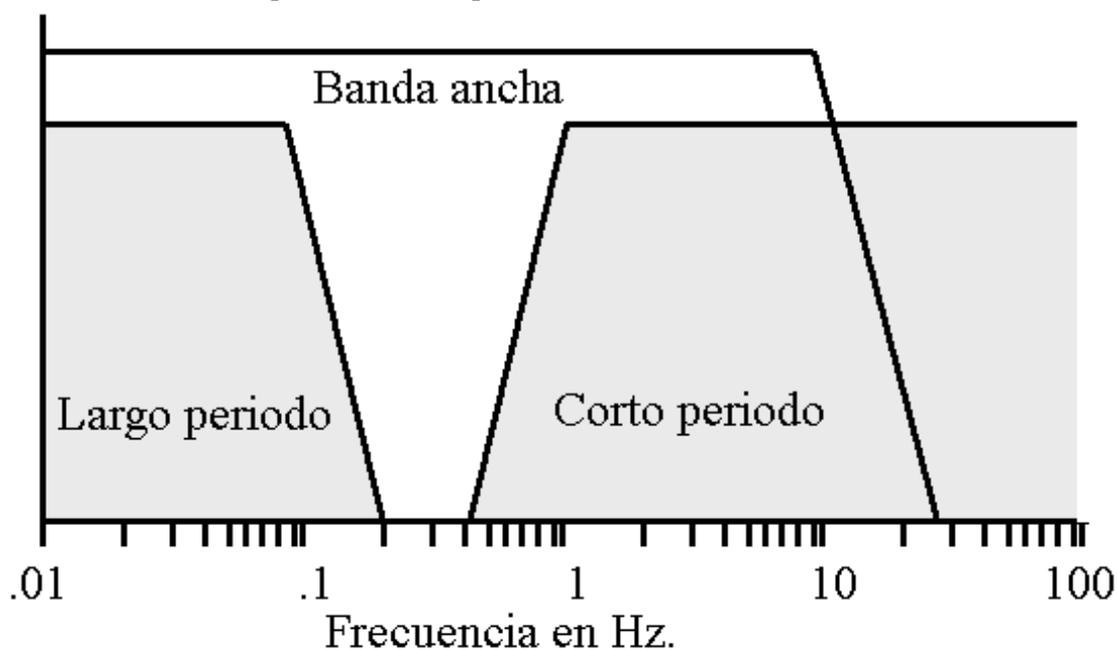


**Figura 8-39.** Para estrella de ocho brazos triples para la implementación de un micro-barómetro. Cada brazo tiene una longitud del orden de 150 m, de esta forma podemos registrar eventos con frecuencias propias del orden del segundo.

# GEÓFONOS

## Introducción

Un geófono es un sensor que nos proporciona información sobre el movimiento del suelo, hoy en día los más utilizados son los geófonos electromagnéticos, aunque cada vez son más las realizaciones que utilizan otros tipos de sensores para convertir el movimiento en una señal eléctrica. Las señales sísmicas cubren una banda de frecuencias muy amplia, desde las fracciones de miliherz para los modos de oscilación normales de la Tierra hasta los cientos de hertz en prospección sísmica. Siguiendo la clasificación tradicional, tenemos sensores de corto periodo que trabajan con periodos inferiores a pocos segundos y largo periodo con periodos propios superiores a diez segundos. Esto es así por existir alrededor de los cinco segundos una señal característica asociada a la interacción del mar y la atmósfera y que es conocida como microsismo. Por ello los sismólogos clásicos eliminaron esta banda para poder trabajar con mayores amplificaciones dada la imposibilidad de filtrar los registros directos proporcionados por los instrumentos de registro mecánico. Hoy, la posibilidad de manipular electrónicamente las señales, unido a la mayor dinámica de los sistemas de registro digital, hace posible utilizar instrumentos que cubran esos periodos intermedios.



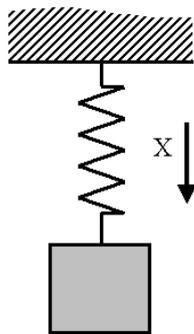
**Figura 9-1.** Los sensores utilizados en sismología se clasifican de acuerdo con la banda de frecuencias cubiertas.

Cuando hablamos en sismología de instrumentos de *banda ancha* (BB) nos referimos a aparatos cuya sensibilidad se extiende a la zona de *bajas frecuencias*. Los sensores de este tipo son precisamente los más costosos. Esto es así por la dificultad de referir el movimiento del suelo a un sistema que no se vea afectado por las vibraciones sísmicas y, como consecuencia de esto, al uso de sensores inerciales. Este tipo de sensores reacciona a la aceleración respecto de un sistema inercial y por tanto son incapaces de detectar componentes continuas de la velocidad y, por supuesto, de desplazamiento. Desde el punto de vista tecnológico, las dificultades provienen de que los períodos más largos de

las vibraciones sísmicas coinciden con los tiempos característicos de una serie de perturbaciones ambientales (cambios de temperatura o presión), y también de las características de ruido interno de los dispositivos electrónicos que llevan asociados. Por otra parte, instrumentos de *largo período* han sido substituidos en gran medida por los de banda ancha y participan del alto coste de éstos y a menudo son aún poco robustos, por lo que su uso en campo y en estaciones portátiles está muy limitado.

### El geófono electromagnético

Un geófono electromagnético consiste simplemente en una bobina que se mueve en un campo magnético suspendida de un sistema de resortes. El sistema más sencillo es una masa suspendida de un resorte.



**Figura 9-2.** Principio de un sensor sísmico vertical. Una masa suspendida de un resorte. Esta masa permanece en reposo cuando el soporte se mueve verticalmente con periodos inferiores al periodo propio del sistema.

Un sistema de este tipo responde a la ecuación diferencial:

$$m \frac{d^2 x}{d t^2} = - k x$$

La frecuencia propia está relacionada con la constante de recuperación de la suspensión  $k$  y con la masa móvil del sistema  $m$  en la forma:

$$\omega_0 = 2 \pi f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

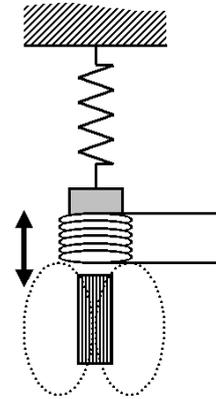
En realidad debemos utilizar sistemas amortiguados que responden a una ecuación diferencial del tipo:

$$m \frac{d^2 x}{d t^2} = - k x - \delta \frac{d x}{d t}$$

siendo  $\delta$  un factor de amortiguamiento. En este caso la frecuencia propia varía con el amortiguamiento:

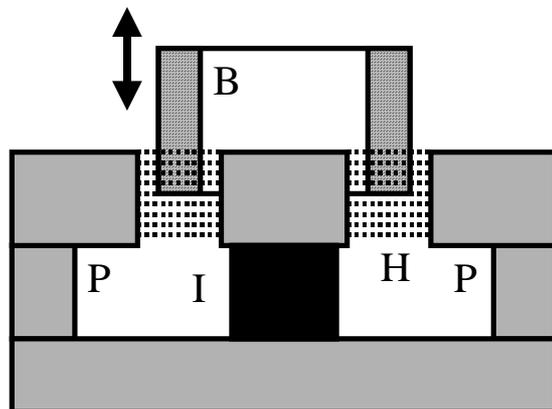
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{\delta^2}{4m^2}}$$

Para sistemas sobreamortiguados no existe oscilación posible. Es importante destacar que el aumento del amortiguamiento disminuye la frecuencia propia.



**Figura 9-3.** Principio de un geófono electromagnético. La masa suspendida lleva acoplada una bobina que se mueve en un campo magnético no uniforme. A la salida de la bobina obtendremos una señal que para pequeños desplazamientos será proporcional a la velocidad.

La transformación del movimiento de la masa en una señal eléctrica puede hacerse de muchas maneras. Tradicionalmente se ha utilizado un transductor inductivo: la masa móvil incorpora por una bobina que se mueve en un campo magnético. A la salida de la bobina tendremos una señal función de la velocidad con la que se mueve el sistema. Si el campo magnético y la geometría de la bobina son adecuados se puede admitir que para valores pequeños del desplazamiento la señal es proporcional a la velocidad de la masa.



**Figura 9-4.** El circuito magnético se diseña de forma que el campo sea uniforme en el entre hierro de las piezas polares y prácticamente nulo fuera. De esta forma el campo que atraviesa la bobina es proporcional a la fracción de esta que está dentro del entre hierro. P piezas polares, B bobina. I Imán permanente. H entre hierro.

La fuerza electromotriz inducida en la bobina de inductancia L es

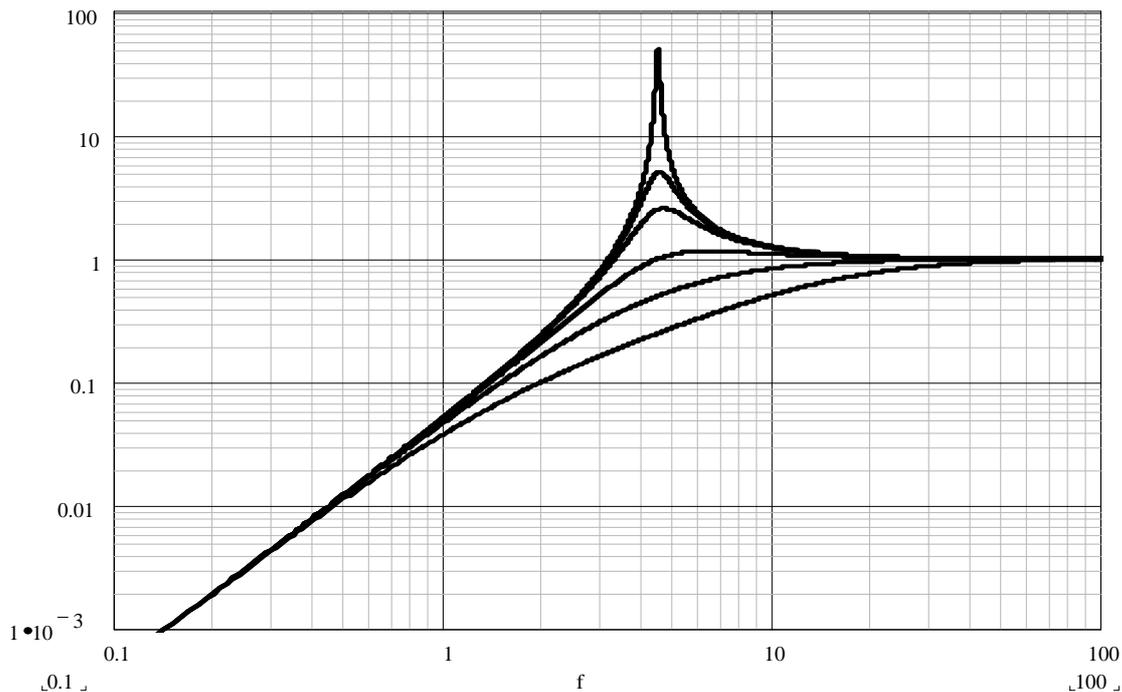
$$E = -L \frac{dH}{dt}$$

si se admite que  $H = H_0 x$ , donde x es la parte de la bobina que se encuentra dentro del entre hierro

$$E = -L \frac{H_0 dx}{dt} = -L H_0 \frac{dx}{dt}$$

La función de transferencia de un geófono electromagnético es

$$G(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2 \delta \omega_0 s + \omega_0^2}$$



**Figura 9-5.** Respuesta de un sistema con amortiguamientos de 0.01, 0.1, 0.2, 0.5, 1,2

### Geófonos capacitivos

Hoy es posible construir geófonos que trabajen con otro tipo de transductores: capacitivos (los más utilizados), de reluctancia variable, ópticos, etc. En general este tipo de transductores proporciona una señal proporcional al desplazamiento. Un transductor capacitivo elemental está constituido por dos armaduras fijas alimentadas con una tensión alterna opuesta y una placa solidaria a la masa móvil. La tensión en esta es:

$$V_c = (V_1 - V_2) \frac{\frac{1}{C_2}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

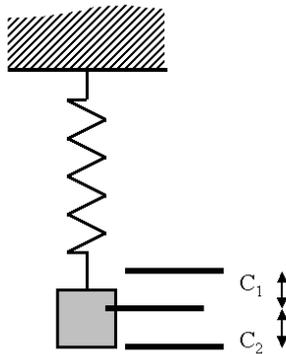
Si el sistema cumple la condición de que la superficie enfrentada de ambos condensadores sea idéntica, recordando que para un condensador plano se tiene:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}$$

y para  $dx$  muy pequeño se obtiene:

$$V_c = K (V_1 - V_2) dx$$

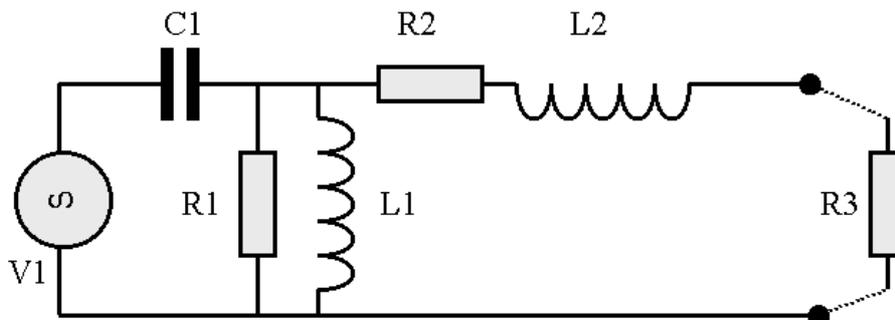
donde  $K$  un factor geométrico.



**Figura 9-6.** geófono vertical con sensor capacitivo de desplazamiento. El sensor está formado por las capacidades  $C_1$  y  $C_2$  que son variables en función de la posición de la masa.

### Circuito equivalente a un geófono electromagnético

Un geófono electromagnético se puede representar mediante un circuito analógico utilizando componentes pasivos ( $R L C$ ) y una fuente de tensión para representar el movimiento del suelo. Con ella se encuentra un *circuito equivalente* del geófono en el sentido de que la ecuación que lo describe es formalmente idéntica a la de éste, cambiando las variables. En el circuito propuesto  $C_1$  representa la masa móvil,  $L_1$  equivale a la constante de recuperación de la suspensión,  $R_1$  el amortiguamiento en circuito abierto,  $R_2$  la resistencia eléctrica de la bobina,  $L_2$  la inductancia eléctrica propia de la bobina y  $R_3$  la resistencia externa de amortiguamiento. Este modelo es muy útil para diseñar el circuito del preamplificador, ya que se puede integrar sin dificultad en las técnicas habituales de diseño electrónico.



**Figura 9-7.** Circuito equivalente a un geófono electromagnético.

La analogía se establece entre el sistema de ecuaciones del movimiento de la masa del sensor, con sus equivalentes del circuito eléctrico.

$$F = M \frac{dv}{dt} \leftrightarrow i = C \frac{du}{dt}$$

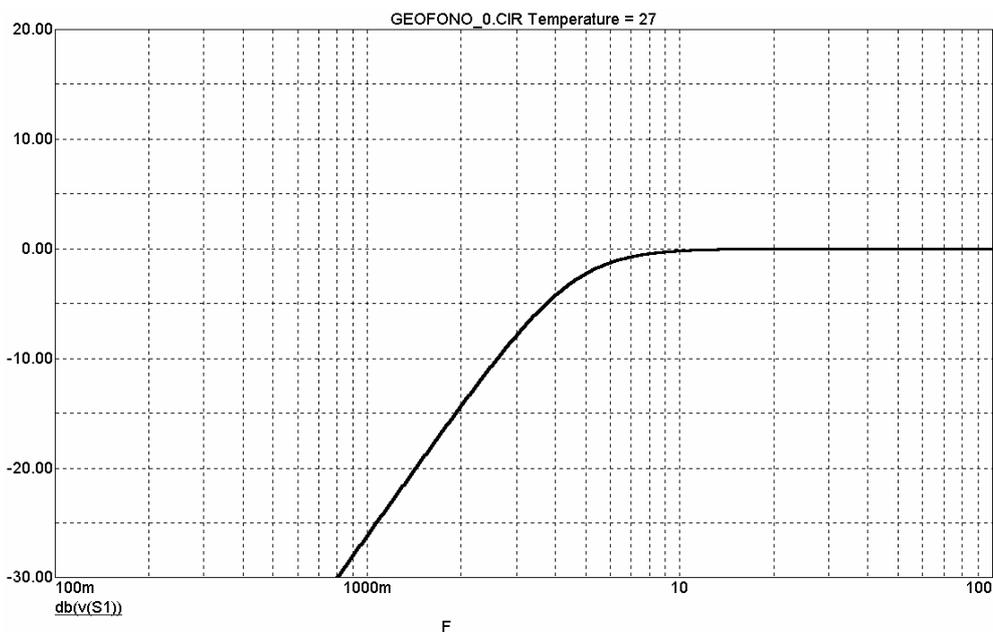
$$F = k \int v dt \leftrightarrow i = \frac{1}{L} \int u dt$$

$$F = Dv \leftrightarrow i = \frac{1}{R} u$$

$$x \left( s^2 + \frac{D}{M} s + \frac{k}{M} \right) = z s^2$$

$$u_0 \left( s^2 + \frac{1}{RC} s + \frac{1}{LC} \right) = u_s s^2$$

En general, el fabricante nos suministra la información básica del sensor, tal como su frecuencia propia, amortiguamiento en circuito abierto, constante de transducción y masa móvil. En general también nos proporcionan el valor de la resistencia y de la autoinducción de la bobina sensora  $R_2$  y  $L_2$ . En caso contrario se puede medir directamente bloqueando la masa móvil y utilizando la instrumentación habitual de un laboratorio electrónico.



**Figura 9-8.** Simulación de la respuesta de un geófono Mark L28 de 4.5 Hz.

Si  $G$  es la constante de transducción del geófono (en  $V/(cm/s)$ ) y la masa del geófono (en gramos) es  $m$  podemos introducir  $C_1$  (faradios) y  $L_1$  (henrios) haciendo:

$$C_1 = \frac{m}{G^2} \quad L_1 = \frac{1}{\omega_0^2 C_1}$$

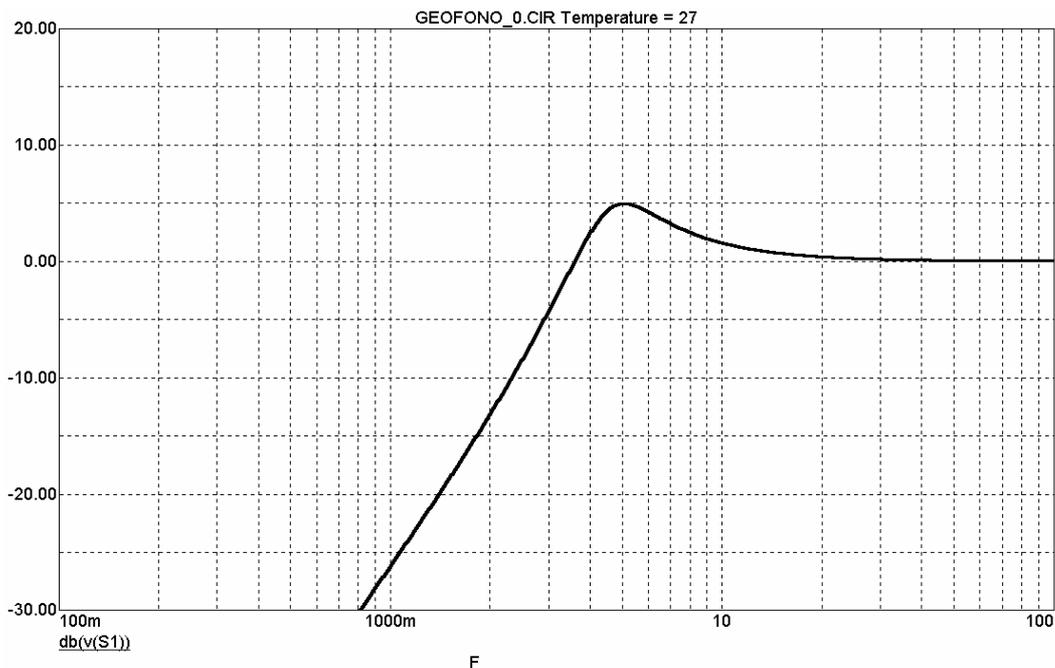
El amortiguamiento en circuito abierto  $\alpha_0$  determina el valor de  $R_1$

$$R_1 = \frac{\omega_0 L_1}{2 \alpha_0}$$

La frecuencia propia de un circuito LC es:

$$f_0 = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L_1 C_1}}$$

No debe sorprender que se obtengan valores muy elevados para  $C_1$  y  $L_1$ , ya que las frecuencias que entran en juego son muy bajas (1 Hz. a 10 Hz.) con respecto a los valores que se utilizan habitualmente en la electrónica práctica (superiores a 50 Hz.). Para un geófono del tipo habitualmente utilizado, como es el Mark L28 se tiene: Frecuencia propia  $f_0 = 4.5$  Hz. Resistencia de la bobina  $R_c = 410 \Omega$ . Amortiguamiento en circuito abierto  $\alpha_0 = 0.7$ . Constante de transducción  $G = 0.304 V/(cm/s)$ . Masa móvil 23 g. Con estos valores el circuito analógico es:  $L_1 = 50$  H.  $C_1 = 25 \mu F$  y  $R_1 = 1 K\Omega$ .  $L_2$  es inapreciable a efectos prácticos por debajo de 200 Hz. Un geófono Geo Space GS11 posee un amortiguamiento mucho menor en circuito abierto (0.3), siendo las otras características muy similares  $L_1 = 46$  H.  $C_1 = 26 \mu F$  y  $R_1 = 2.3 K\Omega$ .



**Figura 9-9.** Simulación de la respuesta de un geófono Geo Space GS11 de 4.5 Hz.

## Ampliación de la respuesta de un geófono electromagnético

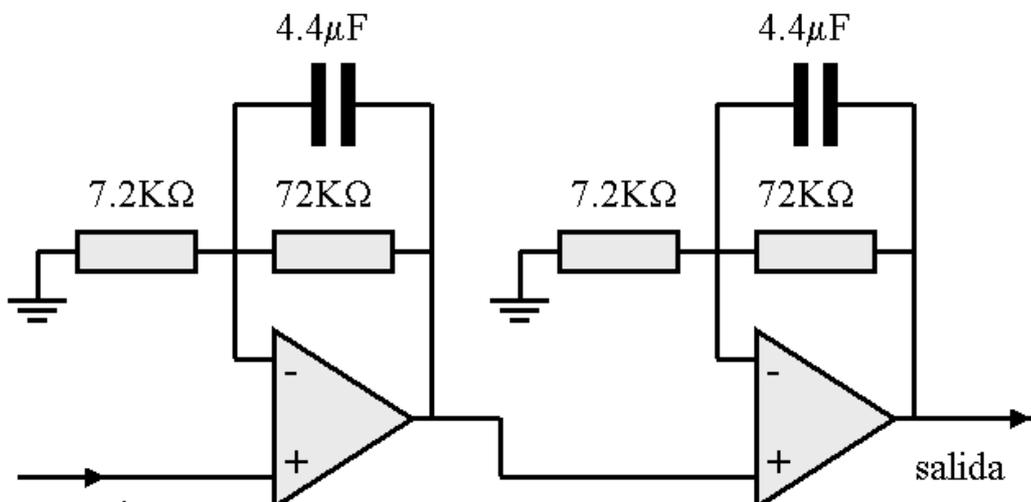
Durante muchos años la sismología ha estado dividiendo el espectro en corto periodo (hasta uno o dos segundos) y en largo periodo (del orden del minuto) para evitar la zona del espectro centrada en 10 segundos donde las sistemas de registro analógico presentaban una pobre relación señal ruido. El desarrollo de los sistemas de registro digital ha permitido trabajar en todo el espectro, conduciendo a la proliferación de los sensores de banda ancha. Por otra parte, la construcción de un sensor es tanto más complicada cuanto más grande sea el periodo. Los sensores de alta frecuencia, utilizados en prospección son mucho más económicos que los utilizados en sismología, incluso que los de corto periodo. (un sensor de 4.5 Hz. cuesta menos de 100\$, un sensor de 1Hz. Supera los 2000 \$). El desarrollo de la electrónica actual posibilita la construcción de un preamplificador que amplíe el margen de frecuencias utilizable de un sensor. De este modo es posible en muchos casos utilizar sensores de bajo costo. El método en esencia consiste en desarrollar un filtro que presente una respuesta inversa que la ofrecida por el sensor. El límite práctico lo impone la relación señal ruido y la estabilidad térmica y a largo plazo del circuito.

### Utilización de un filtro inverso

La función de transferencia de un geófono con amortiguamiento crítico es:

$$G(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2\omega_0 s + \omega_0^2}$$

donde  $\omega_0$  es la frecuencia propia del sistema. La ampliación de la respuesta consiste en conseguir que el geófono responda como si su frecuencia propia fuese  $k\omega_0$  en vez de  $\omega_0$  con  $0 < k < 1$ .



**Figura 9-10.** Filtro inverso para la expansión de la respuesta de un geófono. Deben respetarse al máximo los valores obtenidos para los componentes.

Una posibilidad es utilizar dos integradores con entrada no inversora. La función de transferencia de cada uno de ellos es:

$$F(s) = \frac{s + A \omega}{s + \omega}$$

donde  $\omega$  es

$$\omega = \frac{1}{R_2 C_1}$$

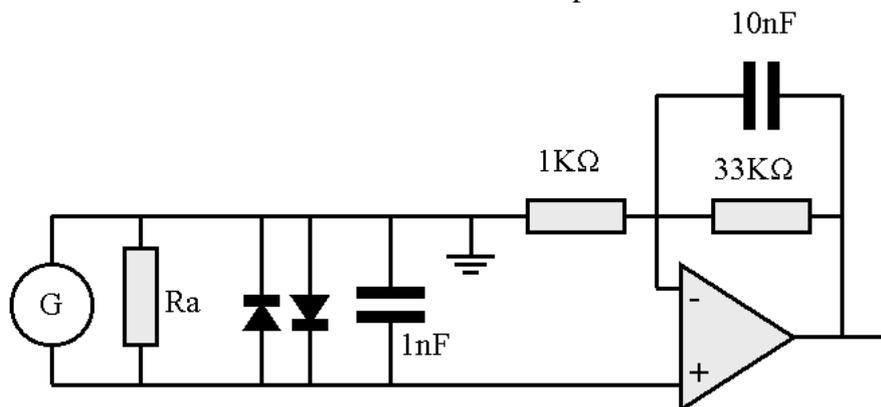
y  $A$  es la amplificación del circuito que viene dada por:

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

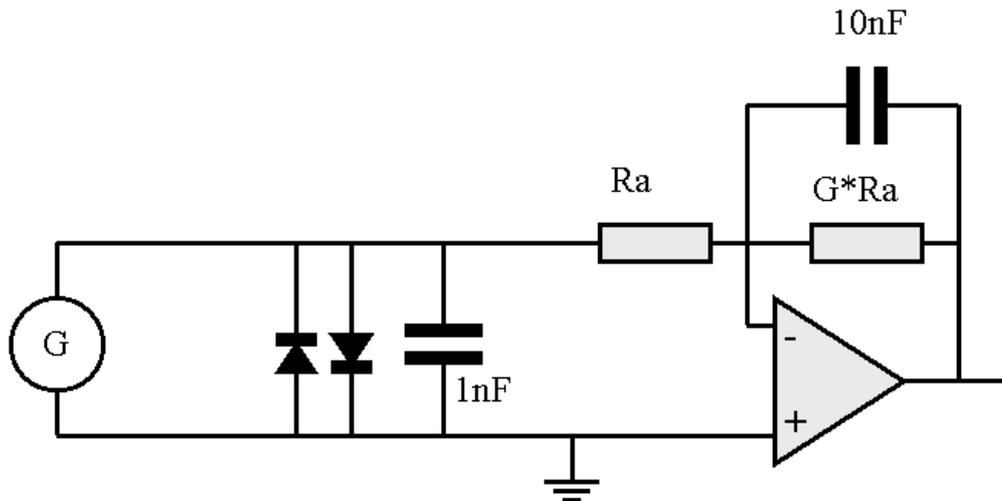
Eligiendo  $A = 1/k$  la función de transferencia del conjunto geófono y filtros será el producto de las tres funciones de transferencia  $G(s) F(s) F(s)$ , obteniéndose:

$$G(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2(k \omega_0) s + (k \omega_0)^2}$$

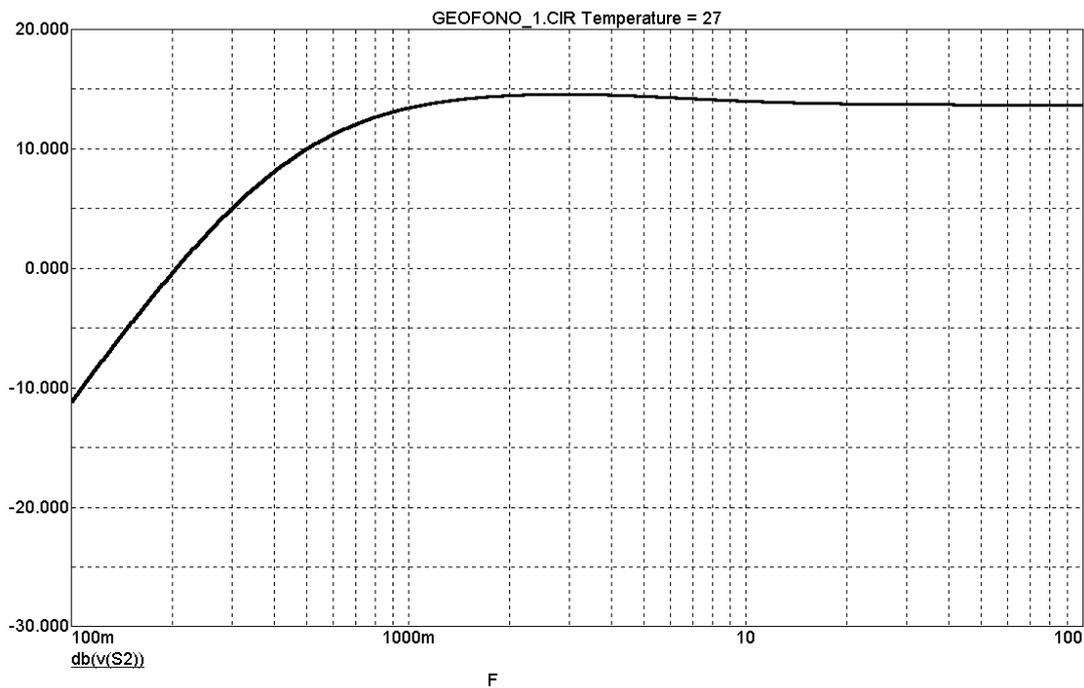
que corresponde a la función de transferencia de un geófono de frecuencia propia  $k\omega_0$ . La realización práctica exige introducir un amplificador antes del filtro para poder mantener la relación señal ruido dentro de límites aceptables.



**Figura 9-11.** La salida del geófono es en general demasiado pequeña para excitar convenientemente el circuito de expansión, por lo que suele ser necesario incluir una etapa amplificadora. Los dos diodos en antiparalelo actúan como protección de la entrada del operacional cuando este no está alimentado o ante un movimiento muy fuerte. El amplificador operacional debe seleccionarse de bajo ruido y con entradas adaptadas a la impedancia del geófono utilizado (por ejemplo LT1028 para geófonos de 400  $\Omega$  y un OP27 para impedancias superiores a 1 K $\Omega$ ).  $R_a$  es la resistencia externa de amortiguamiento. Los condensadores evitan la entrada en el circuito de señales de alta frecuencia, como pueden ser las procedentes del transmisor de telemetría.



**Figura 9-12.** En algunos casos es preferible entrar por la entrada inversora del operacional esto supone que la resistencia de amortiguamiento  $R_a$  interviene en el cálculo de la ganancia del circuito.



**Figura 9-13.** Respuesta del conjunto geófono, amplificador y filtros.

Hay que recordar que este circuito requiere trabajar con el geófono con amortiguamiento crítico. La amplificación en continua es muy grande lo que exige extremos cuidados con el offset y evitar las variaciones de temperatura.

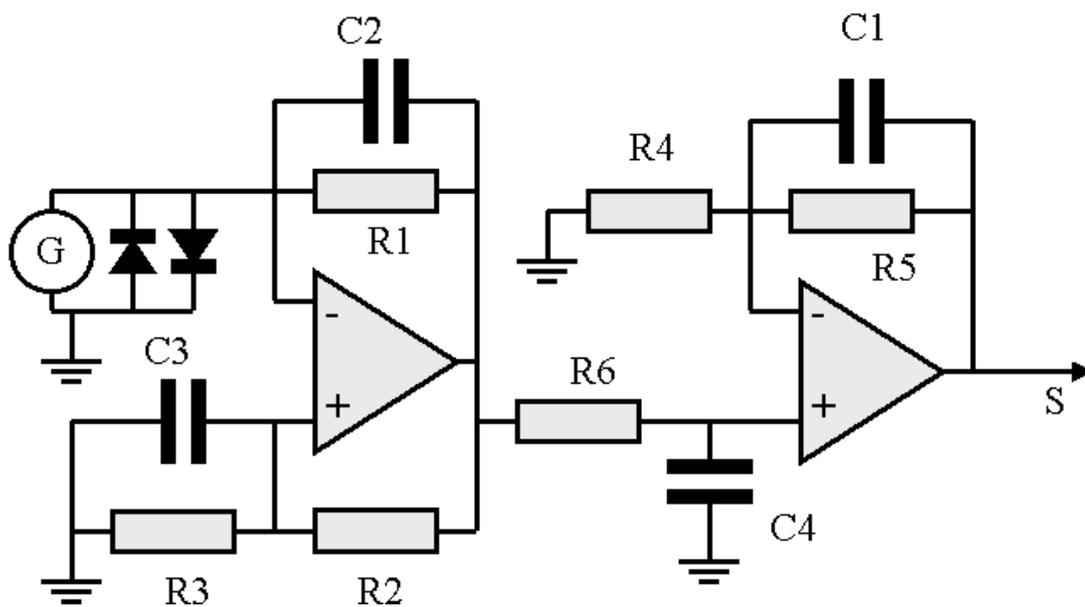
### Método del geófono sobreamortiguado.

La solución anterior requiere el uso de tres amplificadores operacionales, con los problemas asociados de ruido, offset y deriva. Otra posibilidad es trabajar con el geófono sobreamortiguado, y en tal caso se requiere una única unidad de filtro. Para

poder trabajar con amortiguamientos muy grandes es necesario cargar el geófono con una impedancia negativa, de modo que la resistencia total de amortiguamiento sea menor que la propia resistencia de la bobina. Para ello podemos utilizar un amplificador con impedancia de entrada negativa y un integrador. En este caso debemos conocer las características mecánicas del sensor, información que no es necesaria si se utilizan dos filtros. Como ejemplo se muestran los datos de un geófono L28.

Geófono Mark L28	
Frecuencia nominal $f_0$	4.5 Hz.
Resistencia de la bobina $R_c$	410 $\Omega$
Amortiguamiento en circuito abierto $\alpha_0$	$3.2/f_0$
Resistencia shunt para amortiguamiento	$12.5 R_c / \alpha f_0$
Constante de transducción $G$	$0.015 R_c^{1/2}$ V/cm/s
Masa suspendida $m$	23 gr.

Si no se conoce algunos de estas constantes se puede tratar de determinar experimentalmente o proceder por tanteos.



**Figura 9-14.** Preamplificador con impedancia de entrada negativa.

El método de cálculo más sencillo consiste en adoptar un valor para el amortiguamiento  $\alpha$  (un valor entre 3 y 5 es un compromiso entre la ampliación de la respuesta y la estabilidad del sistema) y para la ganancia del sistema A. La resistencia que debe presentar la entrada del amplificador para conseguir el amortiguamiento  $\alpha$  es:

$$R_i = \frac{G^2}{2 m \omega (\alpha - \alpha_0)} - R_c$$

como queremos que la amplificación sea A se tiene:

$$k = \frac{R_i}{A(R_i + R_c) - R_i}$$

se elige un valor para  $R_3$  que para mayor estabilidad del amplificador operacional se hace igual a  $R_c$  y se calculan  $R_1$  y  $R_2$  utilizando las relaciones:

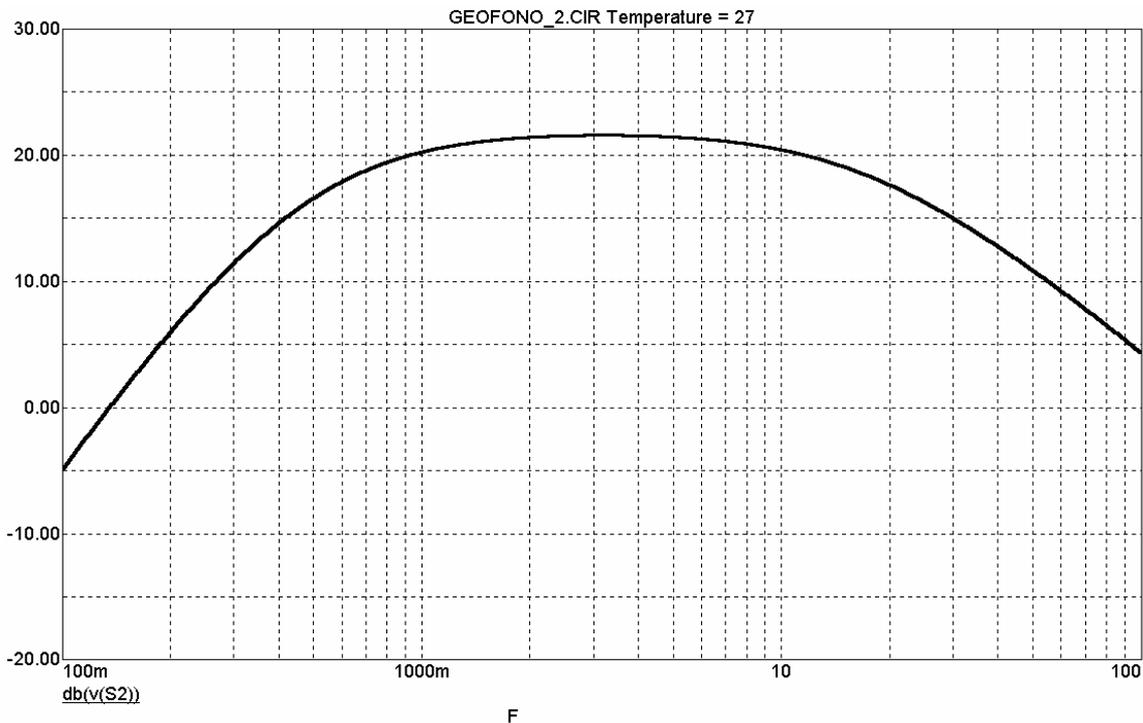
$$R_3 = k R_2 \text{ y } R_1 = A(R_i + R_c) - R_i$$

Los componentes del filtro se calculan partiendo de la pareja de polos conjugados

$$\omega_1 = \omega_0 \left( \alpha - \sqrt{\alpha^2 - 1} \right) \quad \omega_2 = \omega_0 \left( \alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1} \right)$$

Se adopta un valor para el condensador  $C_1$  y calculando las resistencias  $R_4$  y  $R_5$

$$R_4 = \frac{1}{\omega_2 C_1} \quad R_5 = \frac{1}{\omega_1 C_1}$$



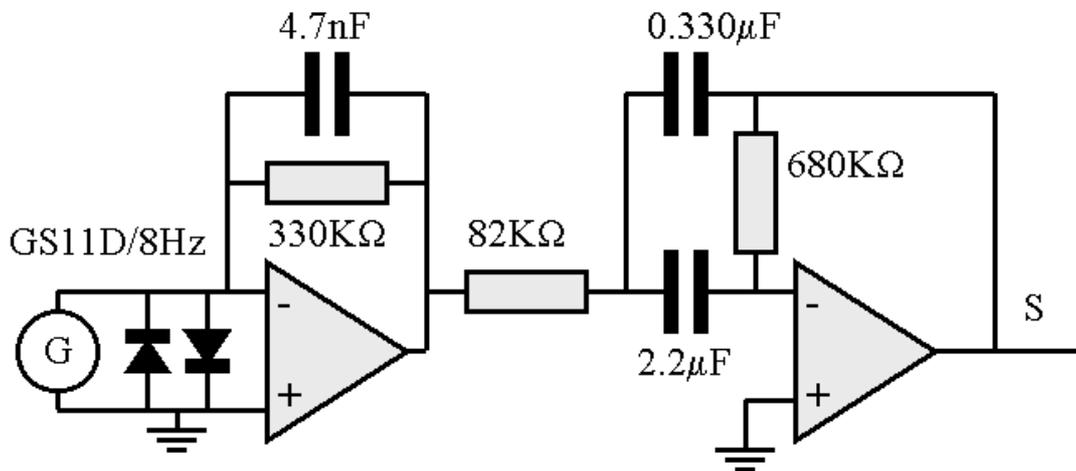
**Figura 9-15.** Respuesta en frecuencia del conjunto geófono-ecualizador. La disminución de la sensibilidad por encima de 10 Hz. es consecuencia del filtro RC situado entre ambos amplificadores y que contribuye al filtrado antialias.

La función de transferencia del ecualizador es:

$$F(s) = \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{1 + \frac{s}{\omega_1}}$$

Se ha adoptado  $\alpha = 5.5$ ,  $R_3 = 410 \Omega$ , con ello se obtiene  $R_1 = 1.0 \text{ K}\Omega$ ,  $R_2 = 1.7 \text{ K}\Omega$ ,  $R_6 = 736 \Omega$  y  $R_7 = 87 \text{ K}\Omega$ . Para asegurar la estabilidad del circuito a altas frecuencias se incluyen los condensadores  $C_2$  y  $C_3$  (4.7nF), así como el filtro RC formado por  $R_6$  (100 K $\Omega$ ) y  $C_4$  (100 nF).

Para mejorar la estabilidad es conveniente que las resistencias en las entradas de los amplificadores operacionales sean iguales. Se puede conseguir realizando varias aproximaciones con valores distintos para las resistencias y condensadores que quedan libres. También deberá cuidarse que los valores finales para los distintos elementos correspondan a las series normalizadas de componentes electrónicos. Es obvio que se deberán elegir amplificadores de muy bajo nivel de ruido, optimizados para trabajar con una entrada igual a la impedancia del geófono como el LT1028 para 410  $\Omega$  aunque en ocasiones será necesario utilizar componentes de bajo consumo.

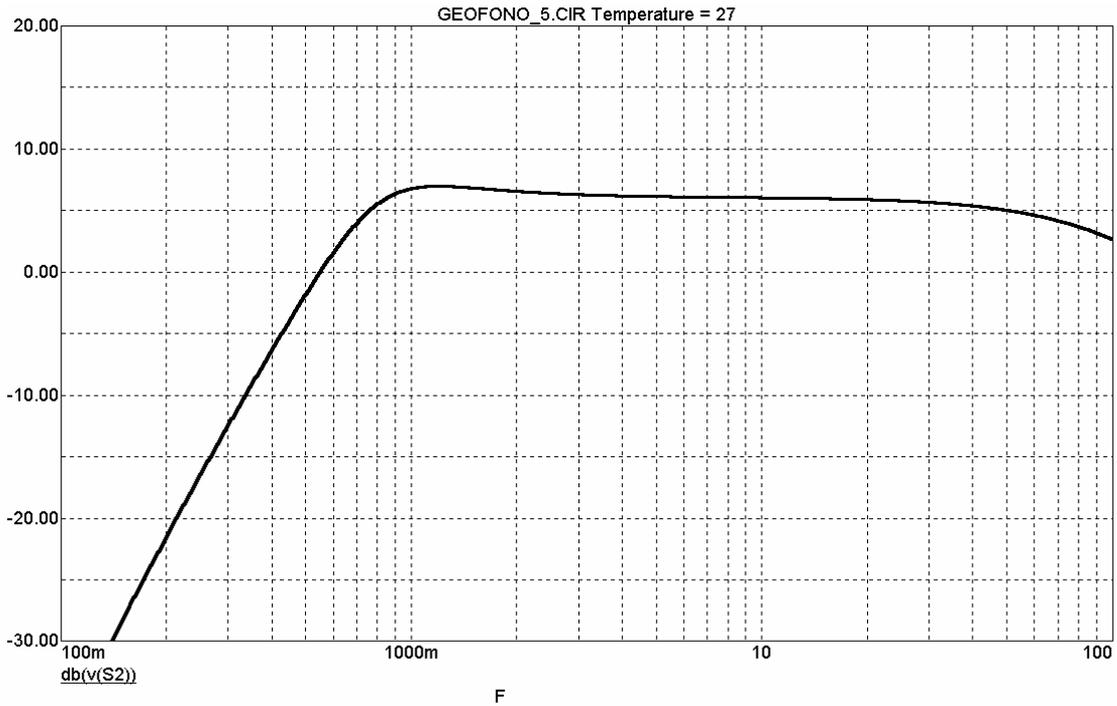


**Figura 9-16.** Circuito ecualizador que utiliza un filtro pasa banda. Valores del filtro optimizados para geófonos de 8 Hz. El amplificador operacional de entrada es de bajo ruido como LT1028 o OP27, el segundo es de alta impedancia de entrada como TL071 o TL061. La ganancia debe ajustarse de acuerdo con el geófono y el sistema de conversión analógica digital utilizada. Para ello es suficiente con aumentar o disminuir  $R_1$  (330K).

### Ampliación de la respuesta de un geófono de muy alta frecuencia

La respuesta que suele exigirse a un sistema de registro microsísmico digital suele extenderse desde 1 Hz hasta 10 Hz, cayendo rápidamente fuera de estos límites, por

abajo para evitar el ruido microsísmico, por arriba a causa del filtro antialias. En esta situación podemos diseñar un sistema que utilice un geófono de 8 Hz, preferiblemente con una elevada resistencia de la bobina, para que tengamos una sensibilidad grande. En este caso la ampliación de respuesta es muy sencilla, pues basta intercalar un pequeño amplificador lineal y una única etapa integradora. A efectos prácticos el sistema presenta una buena estabilidad, aunque el ruido a bajas frecuencias suele ser mayor que con las otras opciones, pero ello no impide que en la práctica ofrezca resultados similares. Como ejemplo se presenta un sistema construido con un geófono GS11D de 3.8 K $\Omega$  de resistencia de la bobina.

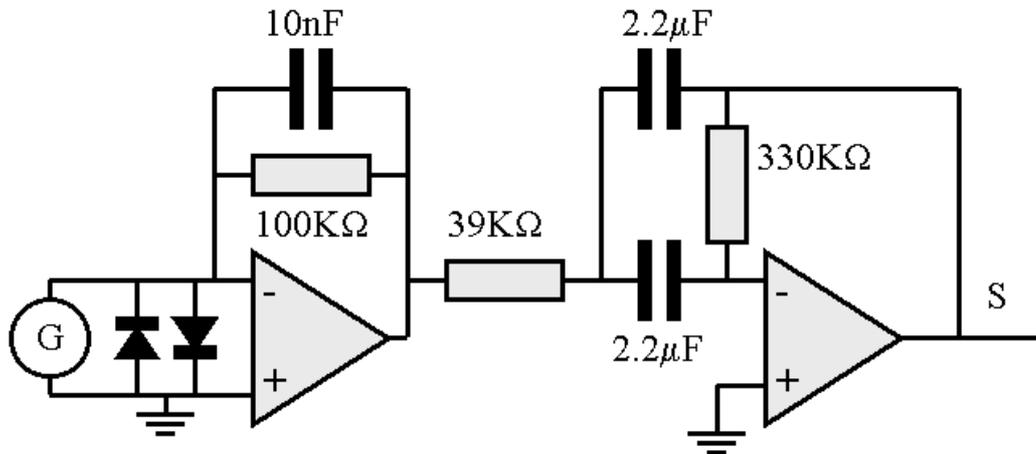


**Figura 9-17.** Respuesta del geófono GS11D con el circuito abierto.

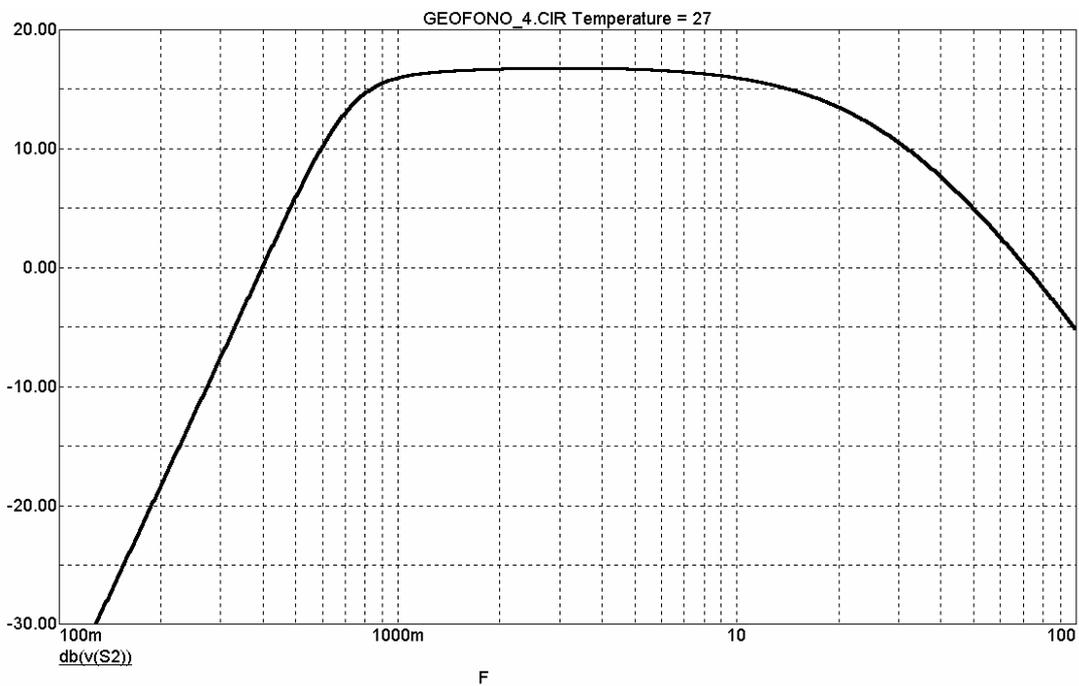
El preamplificador se ha diseñado con un OP27, ya que debido a la elevada resistencia de la bobina, este operacional presenta mejores características de estabilidad y ruido que el LT1028. La entrada por la puerta inversora del amplificador operacional provoca un amortiguamiento muy grande al geófono, con lo en cierto modo estamos en una situación similar al geófono sobreamortiguado. La etapa de filtro es idéntica a la utilizada en el caso anterior. A partir de la frecuencia de resonancia se produce una caída de la señal, lo cual no es problema ya que estamos en la banda que será limitada por el filtro antialias. Para ecualizar la respuesta se puede utilizar un integrador como en la realización anterior, pero aquí se emplea un filtro pasa banda. Esta solución, sólo apta para geófonos de frecuencia propia superior a 1 Hz., tiene la ventaja de ofrecer unos niveles de offset a la salida muy inferiores a los otros diseños

La sencillez del diseño, y especialmente su gran estabilidad y bajos niveles de offset que se obtienen con este montaje, lo hemos ensayado con geófonos de 4.5 Hz., comportándose de modo excelente, por lo que lo hemos adoptado como circuito básico para trabajar con geófonos de 4.5 Hz. A frecuencias inferiores es necesario acudir a los

diseños anteriores, salvo que se desee eliminar las frecuencias superiores a la frecuencia propia del sensor.



**Figura 9-18.** Circuito ecualizador que utiliza un filtro pasa banda. Valores del filtro optimizados para geófonos de 4.5 Hz. El amplificador operacional de entrada es de bajo ruido como LT1028 o OP27, el segundo es de alta impedancia de entrada como TL071 o TL061. La ganancia debe ajustarse de acuerdo con el geófono y el sistema de conversión analógica digital utilizada. Para ello es suficiente con aumentar o disminuir R1 (39K).



**Figura 9-19.** Respuesta del geófono L15B con el circuito de la figura 15.

Otra posibilidad es utilizar un filtro digital para corregir la respuesta del geófono. El problema radica en el elevado número de operaciones necesarias para obtener una respuesta adecuada, especialmente si no se desean atenuar las frecuencias superiores a la frecuencia propia del sensor. Esto implica disponer para la adquisición de datos de un computador mucho más potente, especialmente en cálculo en coma flotante y trabajar con conversores de alta resolución, preferentemente de 24 bits. Cuando se puede prescindir de las altas frecuencias, por ejemplo trabajando con un geófono de 4.5 Hz a 50 muestras por segundo se puede cortar a partir de 12 Hz, es posible diseñar un filtro FIR con relativamente pocos coeficientes (del orden de 10).

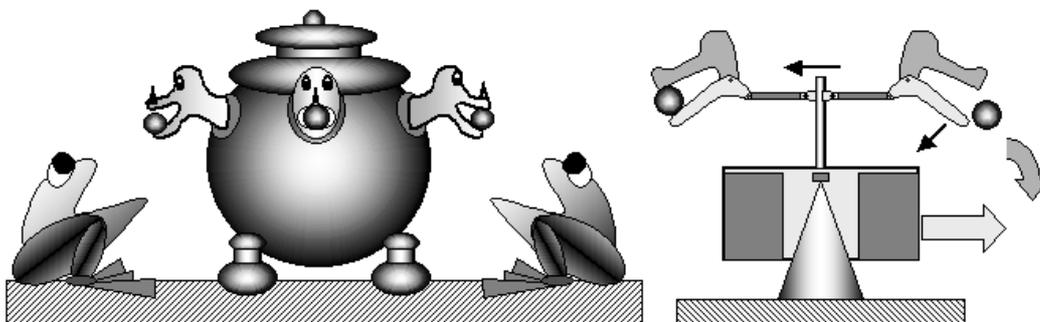
### **Otras consideraciones**

Es importante que las conexiones del geófono al preamplificador sean lo más cortas posibles. En general, el preamplificador está permanentemente conectado al geófono, por lo que hay que disponer siempre dos diodos en antiparalelo para evitar que se pueda dañar la entrada del primer amplificador por un movimiento brusco del geófono, por ejemplo durante el transporte. Cuando se utilizan fuentes de alimentación de tipo conmutado hay que cuidar con especial atención que el rizado residual de la fuente no se propague por la cadena de amplificación. Esto implica evitar lazos en la masa y utilizar condensadores de desacoplo en cada uno de los circuitos. Para poder utilizar cables moderadamente largos para la conexión del preamplificador al conversor analógico digital es conveniente disponer una resistencia en serie con la salida (100  $\Omega$  es suficiente en la mayoría de los casos). Es conveniente recalcular todos los componentes de acuerdo con las características del sensor que se vaya a utilizar. Puede utilizarse cualquier programa de diseño de circuitos electrónicos en su versión educacional, ya que el número de componentes que intervienen es muy reducido.

# REGISTRO SÍSMICO ANALÓGICO

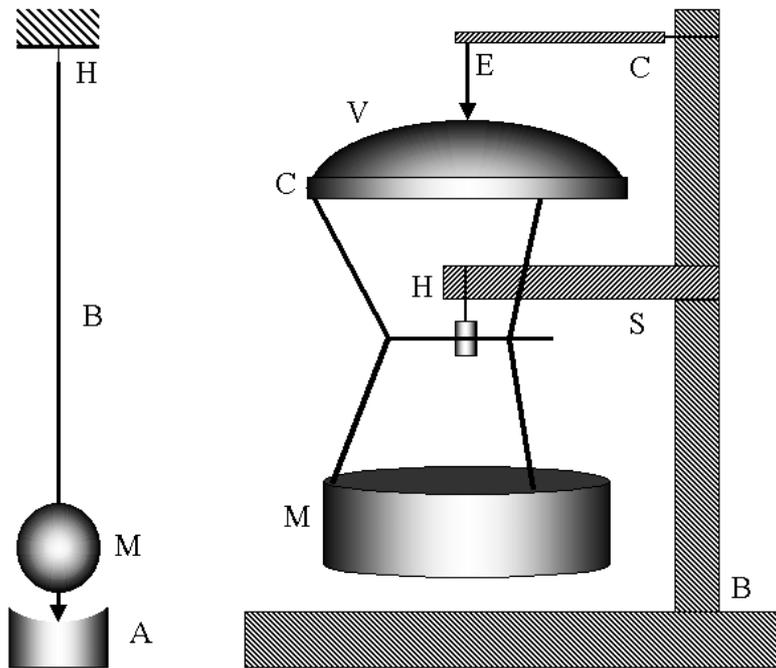
## Introducción

El estudio de los temblores despertó el interés desde muy antiguo, por ejemplo, en la Historia Natural de Plinio encontramos referencias a los temblores, a su origen e incluso recomendaciones para la construcción de edificios en zonas sísmicas. El estudio instrumental de los movimientos del suelo nace a fines del siglo XVIII, aunque hay referencias a instrumentos más antiguos. Los primeros instrumentos eran simples péndulos, a los que se añadía un sistema de aviso (unas campanas) o un estilete que marcaba sobre la arena el movimiento del suelo o detenía la marcha de un reloj, etc. Ya en el siglo XIX aparecen los primeros sistemas que podríamos considerar como verdaderos sismógrafos, que registraban sobre una banda de papel ahumado el movimiento del suelo amplificando mediante un sistema de palancas el movimiento relativo de una pesada masa inercial. A partir de los primeros años del siglo XX aparecen los primeros sistemas de registro electromagnético y a sobre 1960 los primeros equipos con elementos electrónicos. Aunque las nuevas tecnologías permiten el diseño de equipos sencillos, de bajo costo y que sin embargo presentan unas excelentes características operativas, los sistemas analógicos están desapareciendo rápidamente, sustituidos por sistemas digitales. Sirva este capítulo para recordar más de 200 años de registro sísmico analógico.

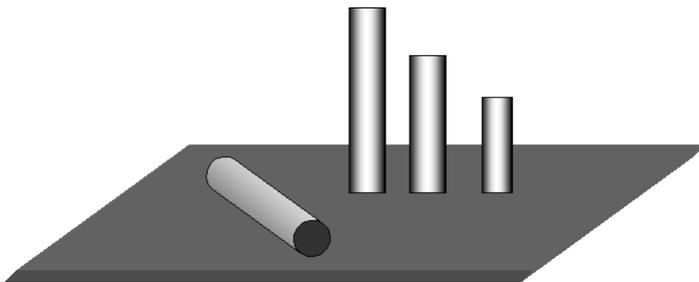


**Figura 10-1.** Representación de un sismoscopio chino. Una gran masa está suspendida, constituyendo un péndulo invertido. Cuando se produce un movimiento fuerte, el sistema de palancas libera las esferas retenidas en las bocas de los dragones que caen dentro de las ranas colocadas a su alrededor.

Entre los sistemas de registro sísmico analógico hay que considerar una gran cantidad de instrumentos, entre ellos están los simples detectores de fuertes movimientos basados en la caída de pequeños objetos situados en situaciones críticas de equilibrio, los contadores de eventos, los registradores mecánicos sobre papel o vidrio ahumado, los instrumentos electromagnéticos con registro fotográfico y los sistemas que incluyen elementos electrónicos más o menos complejos. A pesar de los grandes avances en instrumentación, todavía en muchas áreas activas se utilizan pequeños detectores sísmicos mecánicos (sismoscopios), ya que estos, a pesar de no requerir mantenimiento nunca fallan.



**Figura 10-2.** Un sismoscopio elemental puede construirse mediante un simple péndulo formado por una barra B con una masa en su parte inferior, dotada de un estilete que dibuja en un lecho de arena el movimiento relativo del péndulo. Un dispositivo de este tipo funcionó a fines del siglo XVIII en el Vesuvio. La figura muestra un sismoscopio moderno, constituido por una masa M suspendida de un soporte S mediante un corto hilo H. El registro se realiza mediante un estilete que se apoya sobre un vidrio de reloj V que está ahumado. La parte móvil, compuesta por la masa, el vidrio de reloj y el soporte C, se comporta como un péndulo compuesto, por lo que es posible alcanzar un periodo propio de varios segundos. En los modelos más avanzados se incluye un sistema de amortiguamiento electromagnético consistente en un disco de aluminio que se mueve entre los polos de un fuerte imán. Estos dispositivos, económicos y fáciles de construir, no precisan mantenimiento alguno, proporcionando una información muy útil cuando ocurre un movimiento fuerte.



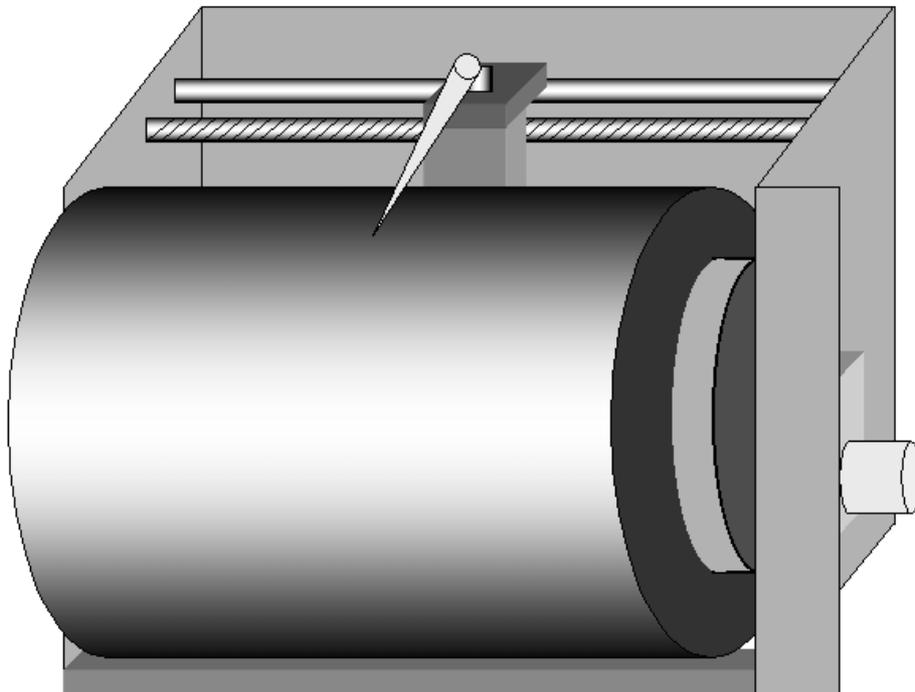
**Figura 10-3.** Otro dispositivo muy sencillo para tener una información sobre la aceleración máxima del suelo se puede construir simplemente con cilindros metálicos de distintas alturas. Sometiéndolos a aceleraciones conocidas se determina a que aceleración cae cada cilindro

### Registrador sísmico de tambor

El registrador gráfico de tambor es el instrumento básico del registro sísmico analógico. Hoy, cuando el registro digital se está extendiendo rápidamente por todo el mundo, todavía muchos sismólogos consideran imprescindible la utilización de registradores gráficos de este tipo para poder controlar visualmente la evolución de la actividad sísmica, aunque en redes sísmicas de muchas estaciones se controla gráficamente sólo un número limitado de ellas. Además, ya los sistemas de procesado digital permiten

obtener la misma información gráfica de forma mucho más sencilla, utilizando una simple impresora conectada a un Pc.

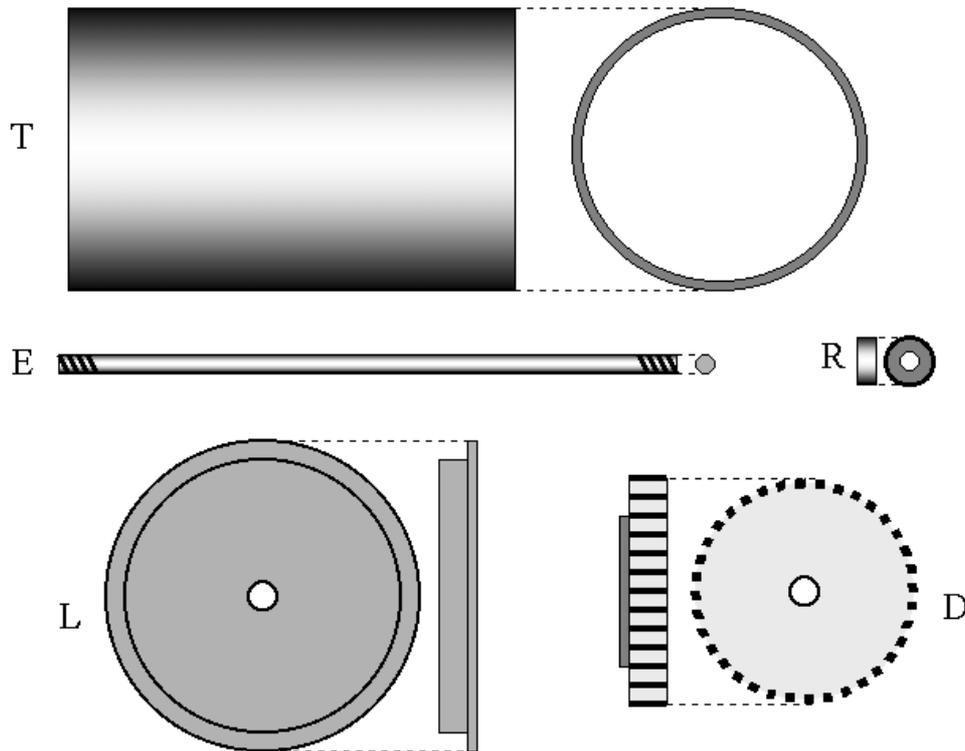
Hay varios sistemas para el registro gráfico como son la tinta, el papel térmico, papel sensible a la presión o papel ahumado. El papel ahumado permite obtener los registros de mayor calidad, sin embargo su empleo es muy engorroso, por lo que su uso ha quedado limitado a aquellos casos donde el registro gráfico va a ser el único disponible. Los peores resultados se obtienen con papel térmico, sin embargo su comodidad de uso y al ser de uso común en los equipos de FAX, es de fácil disponibilidad y de relativo bajo precio, lo que hace que este sea el sistema de registro más utilizado en equipos de monitoreo, especialmente cuando la energía no está limitada. El papel sensible a la presión es poco frecuente y tiene un costo excesivo para muchos observatorios. El registro con tinta presenta una buena calidad si se usa con papel adecuado y reponiendo frecuentemente las plumas, por lo que presenta un alto costo y frecuentemente, interrupciones por fallo en el sistema de tinta.



**Figura 10-4.** Un registrador de tambor está constituido por un tambor que gira uniformemente mientras la pluma de un galvanómetro se desplaza horizontalmente mediante un husillo. Uno o dos motores paso a paso controlan el movimiento.

La resolución de un sistema de tambor es lógicamente muy limitada, tanto en el margen dinámico de los eventos que se pueden registrar sin saturación como en la precisión en la determinación del tiempo de llegada de las distintas fases, de hecho es difícil garantizar el segundo en la determinación de una llegada, sin embargo, su facilidad de manejo y de examen de los registros obtenidos hace que estos instrumentos se sigan utilizando ampliamente en campañas y como monitores en paralelo con los sistemas de registro digital. Como ejemplo presentamos el diseño de un registrador sísmico de tambor de bajo costo y sencilla construcción: se trata de un sistema equipado con un sólo motor, el cual sirve para hacer girar el tambor y simultáneamente arrastrar mediante un husillo el sistema de pluma. Eligiendo convenientemente el acoplamiento

del tambor y el husillo (mediante poleas, poleas dentadas o engranajes) es posible conseguir un espaciado de 3 a 5 mm entre líneas, una velocidad de 60 mm/s y una duración total de registro de 24 horas. El motor elegido es un motor paso a paso cuya velocidad se puede ajustar electrónicamente entre ciertos límites. Es conveniente construir primero la parte mecánica, probar con un oscilador variable cual es la frecuencia óptima de operación del motor y diseñar entonces el circuito electrónico. Hay un gran número de motores paso a paso y síncronos que pueden utilizarse con características muy distintas. En el caso de querer variar independientemente la velocidad de rotación y el espaciado entre líneas es mucho más sencillo utilizar dos motores que un sistema de engranajes múltiples.

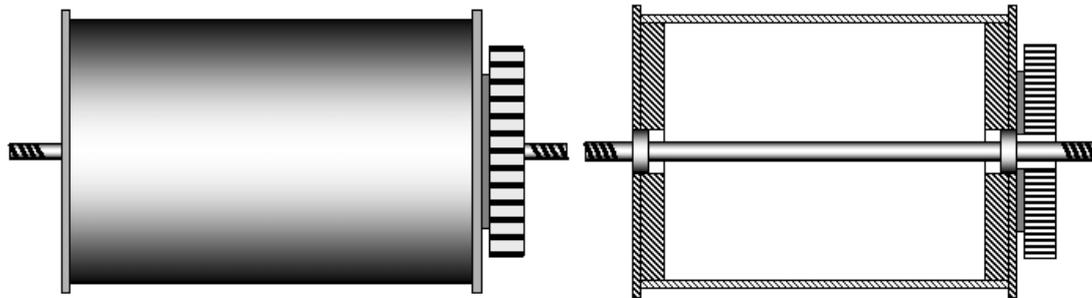


**Figura 10-5.** La realización de un registrador de tambor se inicia construyendo el tambor propiamente dicho. Ya que de sus dimensiones finales dependen todas las otras piezas. Tambor, tapa, eje, rodamiento, polea dentada. T tambor, L tapa lateral, E eje, R rodamiento, D polea (dentada).

### Mecánica.

El registrador sísmico de tambor se ha diseñado de forma que su parte mecánica pueda construirse con un mínimo de elementos, fácilmente mecanizable en cualquier taller mecánico. El único elemento crítico es el servomotor, pues de él depende la calidad final del registrador y salvo disponer de un buen mecánico de precisión es preferible adquirir un buen servomotor. El papel térmico se sujeta al tambor mediante dos trozos de cinta adhesiva o un pegamento suave. En caso de usar papel ahumado hay que diseñar el tambor de forma que sea fácilmente extraíble. Si se quiere utilizar papel de FAX es preferible que el papel se mueva entre dos rodillos, pues al ser de anchura más reducida la separación entre líneas para 24 horas es demasiado pequeña. Las

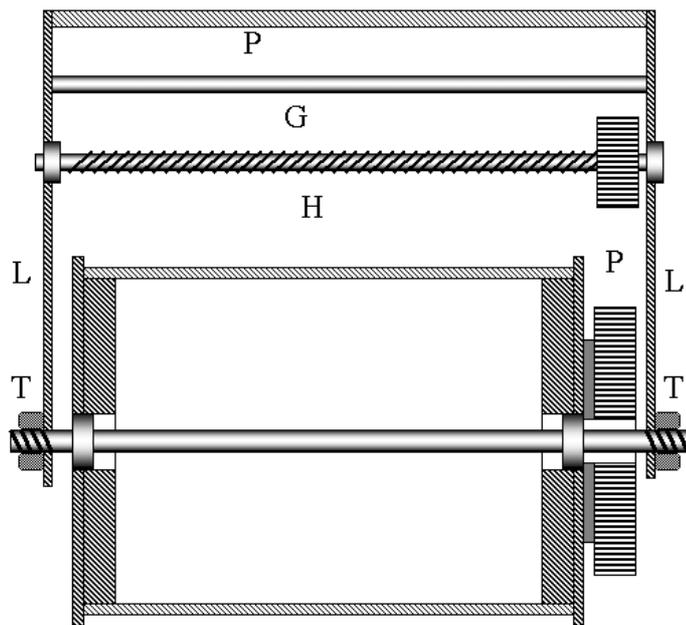
dimensiones del tambor dependen del tamaño de papel disponible a bajo costo, en ocasiones por una diferencia de unos pocos cm, el coste puede ser diez veces mayor. El primer elemento a construir es el tambor, que se puede realizar a partir de una tubería estándar de PVC de tamaño adecuado y que es conveniente repasar en el torno. A esta tubería, una vez refrentada se le acoplan dos tapas en aluminio o PVC, cada una de ellas con alojamiento para un rodamiento. A un lateral se le acopla una polea de transmisión (si es de tipo dentado mejor).



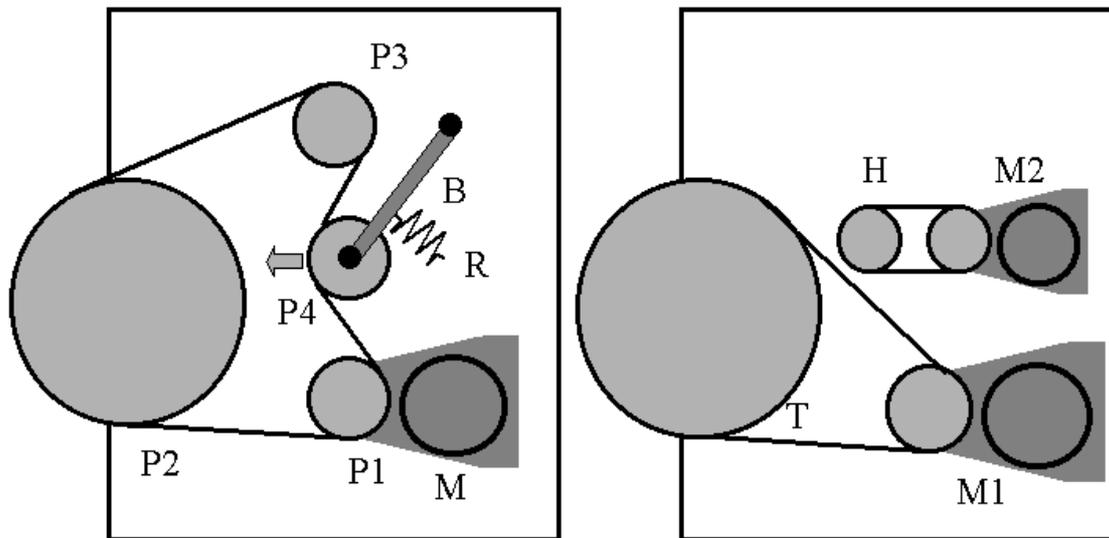
**Figura 10-6.** El conjunto del tambor montado. El tambor debe poder girar libremente alrededor del eje. Si se dispone de un buen taller mecánico se puede acoplar la polea de arrastre al tambor mediante un dispositivo de embrague. En caso contrario, se fija mediante tornillos.

El bastidor está formado por una caja posterior (3) que aloja la electrónica y dos laterales (1, 2). Los dos laterales soportan el eje de rotación del tambor (4). El servomotor se desplaza sobre una varilla (5) arrastrado por un husillo de paso 2mm. El lateral derecho soporta el motor paso a paso (o síncrono) con reductor. Se incluye también una barra inferior (3) para aumentar la rigidez del conjunto. Para simplificar el diseño y disminuir el consumo se ha diseñado el registrador de tambor utilizando un único motor para traslación de la pluma y rotación del tambor. Para ello se ha elegido una transmisión mediante poleas y correa dentada, pues es la solución más simple desde un punto de vista mecánico. Según disponibilidades pueden ensayarse otras soluciones.

**Figura 10-7.** Montaje del tambor en el bastidor. El eje del tambor se sujeta mediante dos tuercas T a los laterales L. El husillo H y la barra guía G deben quedar paralelos al tambor. En caso de utilizarse un único motor, las poleas dentadas P deben quedar alineadas. La parte posterior del bastidor P puede ser una caja que contenga la electrónica.



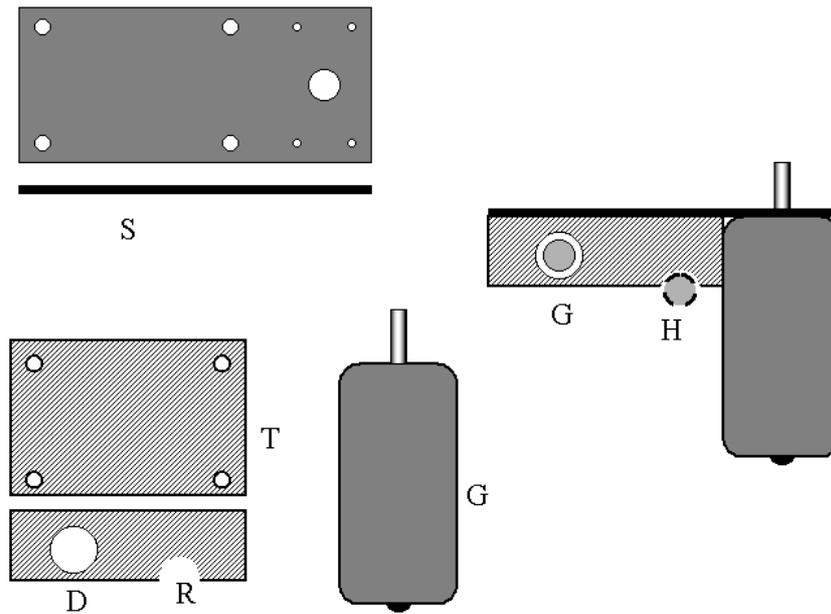
Al lateral derecho del tambor se le acopla una polea P2. Una segunda polea P3 sirve para transmitir la rotación al husillo de arrastre. La relación entre diámetros de las poleas P2 y P3 y el paso del husillo determinan la separación entre líneas. Una tercera polea P1 corresponde al motor M, es importante que esta polea no sea excesivamente grande ya que al tratarse de un motor paso a paso hay que evitar que los pasos del motor se reflejen en la rotación del tambor. Una última polea P4 sirve para tensar la correa de transmisión. Hemos elegido una correa de tipo dentado para simplificar el problema del ajuste del conjunto, especialmente crítico a bajas velocidades de rotación.



**Figura 10-8.** Sistema de arrastre mediante un único motor para rotación y traslación y utilizando motores independientes. M motor, P1 polea motriz, P2 polea de rotación, P3 polea de arrastre, P4 polea tensora. En el caso de utilizarse dos motores el sistema es más sencillo M1 motor de rotación, T polea rotación, M2 motor de traslación, H polea husillo.

Todo el conjunto de poleas y motor está soportado sobre el lateral derecho. Una ranura permite variar la posición de la polea de ajuste de la tensión de la correa. La caja que contiene la electrónica y la varilla de refuerzo se sujetan mediante tornillos. El husillo debe estar soportado por dos rodamientos y mientras que la varilla que sirve de guía del sistema de pluma se fija mediante tornillos. Es importante cuidar el paralelismo del eje del tambor, del husillo y de la varilla de guía. El mecanismo de arrastre del servomotor se basa en utilizar una varilla de guía sobre la que desliza una pieza de plástico (*teflón* o similar) que se apoya mediante una media luna roscada sobre el husillo. El peso del servomotor es suficiente para mantener bien acoplada la media luna al husillo.

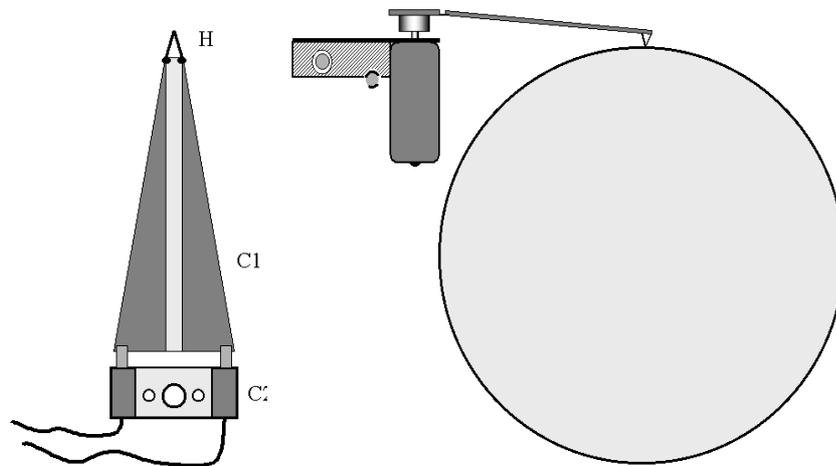
La pieza de arrastre (T) se construye en *teflón* y sobre ella se coloca una placa de aluminio (S) sujeta mediante tornillos. Esta placa sirve de soporte al servomotor (G) y a dos terminales tipo hembra para conectar los cables de la pluma térmica. Los cables del servomotor y de alimentación de la pluma se sujetan al extremo inferior del servomotor y mediante una coca se conectan a la electrónica correspondiente. Para evitar bloqueos en el arrastre es importante que el acoplamiento entre la pieza de arrastre y el husillo (H) sea menor de 180°. La varilla de guía (G) no debe deformarse bajo el peso del servomotor por ello debe tener un diámetro mínimo de 12 mm.



**Figura 10-9.** Soporte del galvanómetro y acoplamiento al husillo. S soporte, T pieza de arrastre (teflón) G galvanómetro, H husillo, G barra guía. Para facilitar el desplazamiento sobre la barra guía, es conveniente colocar un rodamiento lineal D en el interior de la pieza de arrastre.

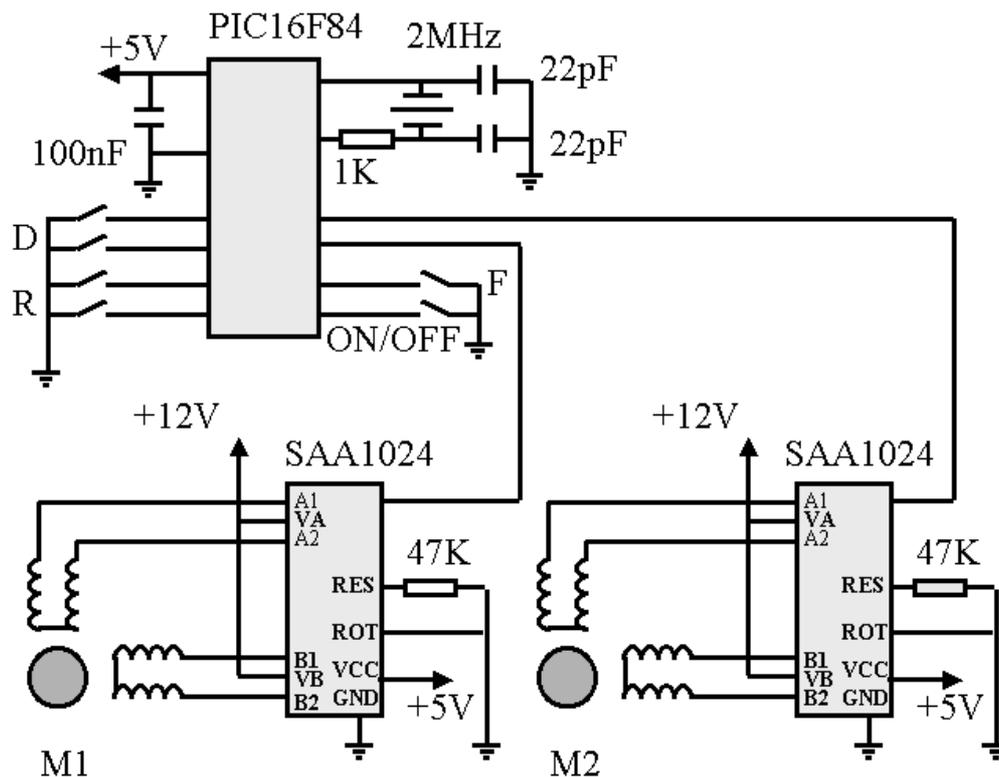
La pluma térmica está realizada mediante una pequeña placa de circuito impreso (C1), unida mediante dos flejes elásticos, realizados en bronce fosforoso a pequeña placa de conexión y soporte (C2), la pluma (H) está formada por un pequeño trozo de hilo de resistencia soldado a la punta de la placa (C1). Es importante utilizar placa de circuito impreso muy fina para reducir el momento de inercia de la pluma y mejorar así la respuesta en frecuencia del conjunto servomotor - pluma. El acoplamiento al servomotor se realiza mediante un pequeño cilindro metálico sujeto al eje del servomotor mediante un tornillo. La placa (C2) se sujeta mediante dos pequeños tornillos al cilindro. Es importante que los flejes sean lo más cortos posibles, así como los puntos de soldadura se realicen con el mínimo de estaño

**Figura 10-10.** Pluma térmica realizada mediante un corto hilo resistivo y dos placas de circuito impresos (C1 y C2). Detalle del montaje de la pluma sobre el tambor.



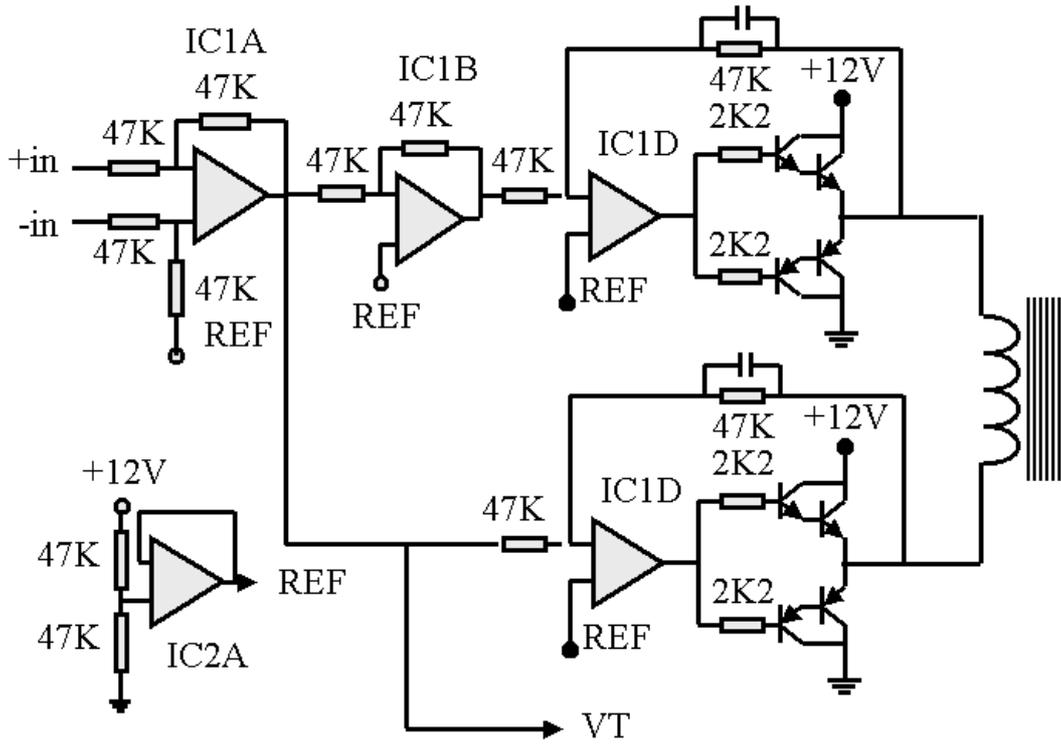
## Electrónica

El circuito electrónico propuesto utiliza un microcontrolador con oscilador de cuarzo que permite ajustar fácilmente las velocidades de rotación y traslación (12, 24 o 48 horas). El control del motor se realiza mediante un circuito especializado SAA1024, pero que puede sustituirse mediante unos pocos circuitos estándar. Para el amplificador de pluma se ha adoptado una configuración diferencial, ya que de esta forma es posible alimentar todo el conjunto con sólo una batería de 12 voltios, simplificándose mucho la operación en campo. El amplificador de entrada es un amplificador diferencial de ganancia 1, a su salida se tiene un amplificador inversor para así obtener la señal y su inversa que se aplican a las dos entradas del amplificador de potencia realizado mediante dos operacional y un par de transistores Darlington complementarios a la salida. Del amplificador diferencial de entrada se obtiene la señal para el control de la temperatura de la pluma y a una de las ramas del amplificador de salida se introduce la señal de tiempo. En función del tipo de reloj de que se disponga deberán seleccionarse las resistencias de entrada de la señal de reloj para que el tamaño de las marcas de tiempo sea del orden de la separación entre líneas. En algunos casos será necesario intercalar un pequeño relé o un opto-aislador.

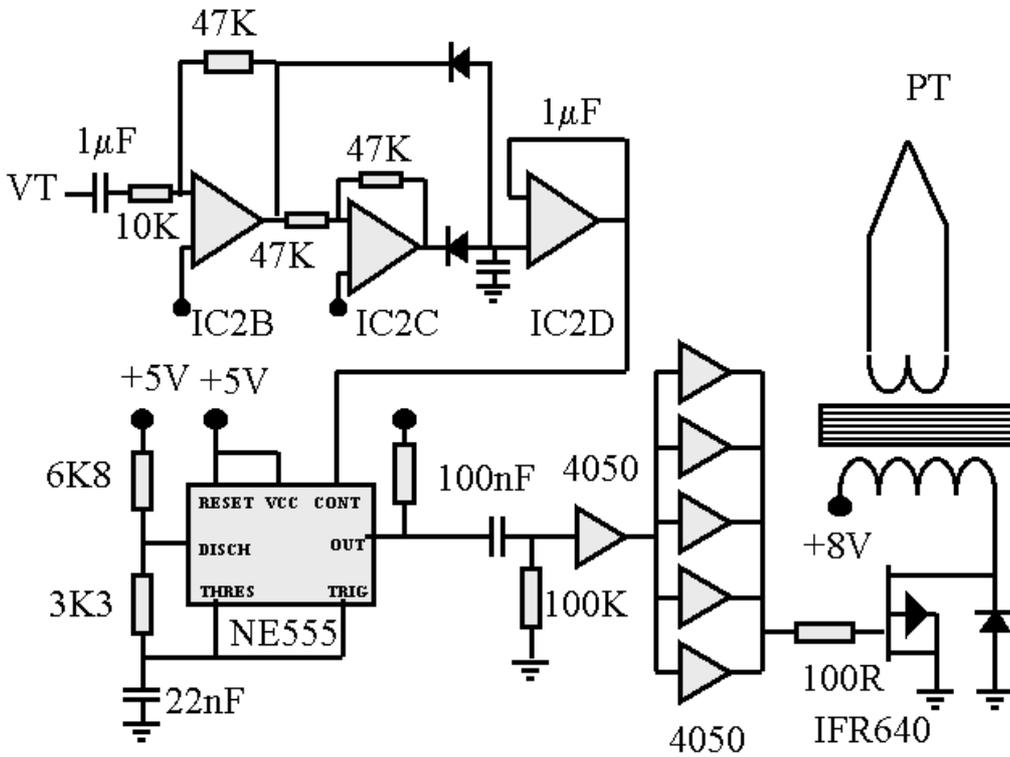


**Figura 10-11.** Circuito de control de los motores pasa a paso. Utiliza un microcontrolador PIC16F84 y uno o dos driver para motores paso a paso SAA1024..

El servomotor de pluma utilizado es un motor galvanométrico MFE077, se pueden utilizar modelos de más calidad, pero ello no mejora sensiblemente el resultado final que se obtiene, pues no hay que olvidar que este tipo de aparatos hoy en día sirve sólo como monitores. Este tipo de servomotor estuvo muy extendido entre los equipos de electromedicina, donde pueden conseguirse alguna unidad de desguace a muy bajo precio



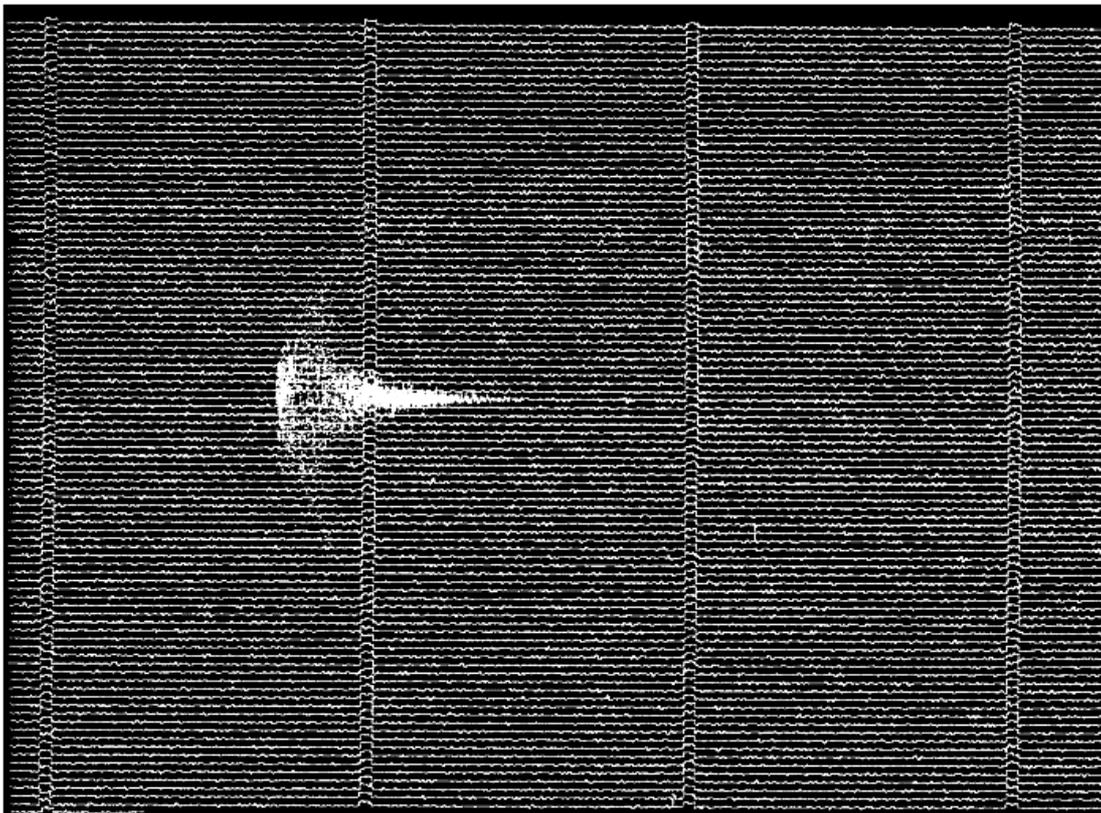
**Figura 10-12.** Amplificador para el movimiento de la pluma. Se utiliza un amplificador diferencial con dos pares de transistores complementarios de salida.



**Figura 10-13.** Circuito de control de la temperatura de la pluma. Utiliza un rectificador de doble onda y un oscilador controlado por tensión (NE555).

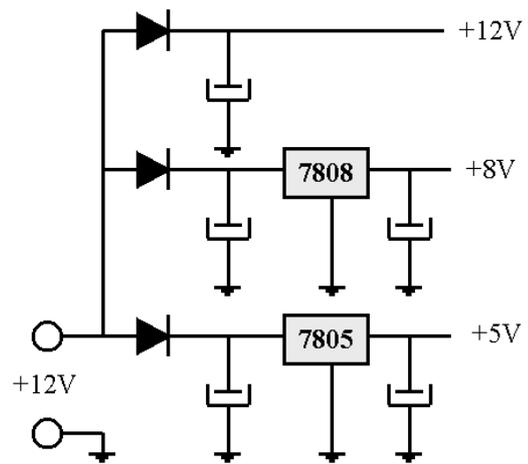
Un operacional se utiliza para obtener el punto medio de la tensión de alimentación que se utiliza como masa virtual. Es necesario cuidar bien todos los desacoplos de las alimentaciones de los respectivos integrados, y limitar la respuesta en alta frecuencia del amplificador de salida para evitar oscilaciones parásitas.

El registrador puede funcionar con papel ahumado, tinta o papel térmico. Nosotros nos hemos inclinado por esta última solución, utilizando una pluma muy sencilla, realizada con una placa de circuito impreso y soldándole a la punta un pequeño hilo de resistencia, la baja resistencia que presenta la pluma obliga introducir un pequeño transformador y alimentar la pluma mediante pulsos de duración variable. De esta forma se obtiene un buen control de la temperatura de la pluma con un consumo moderado. El circuito de control consta de dos partes, la primera de ella modula la frecuencia de los pulsos de acuerdo con la señal de entrada, de forma que cuando más rápidamente se mueva la pluma mayor es la temperatura de la misma. La segunda parte permite el control manual de la temperatura de la pluma ajustando la duración del pulso. Finalmente se incluye un acoplamiento RC para evitar que en caso de fallo de pulso el transistor de salida quede bloqueado en conducción, lo que provocaría la destrucción del mismo.



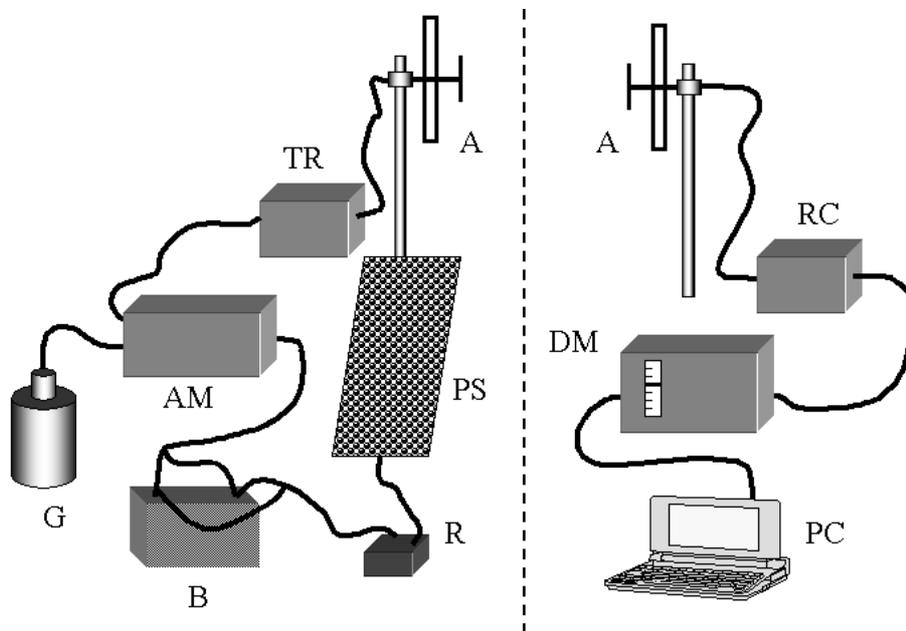
**Figura 10-15.** Ejemplo de registro analógico de un evento sísmico obtenido mediante un registrador de tambor sobre papel ahumado.

**Figura 10-14.** La fuente de alimentación utiliza diodos de protección independientes para cada sección. El regulador de 8V para calefacción de la pluma debe ser de alta corriente y estar montado sobre un radiador.



### Sistemas de telemetría sísmica analógica

La telemetría analógica todavía se utiliza hoy en muchas redes sísmicas, aunque van siendo sustituidos por tecnologías digitales que ya son asequibles a precios razonables y con velocidad suficiente para las necesidades del registro sísmico. Los enlaces analógicos permiten la utilización de canales tipo voz comerciales y de bajo coste (cable, línea telefónica o radio en VHF/UHF) pero es preferible ir migrando ya hacia enlaces digitales, utilizando circuitos de modem compatible con los anchos de banda permitidos en estas líneas.

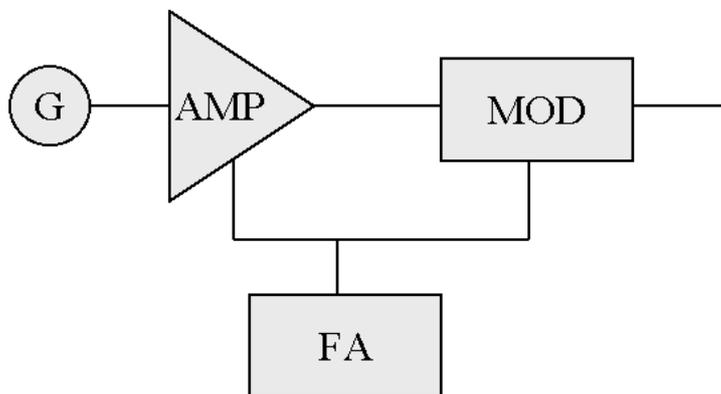


**Figura 10-16.** Diagrama bloque de un sistema de telemetría sísmica analógica. El equipo de campo lo constituyen los siguientes elementos: G geófono, AM amplificador modulador, TR transmisor, A antena, PS panel solar, R regulador de carga. El equipo de recepción está formado por A antena, RC receptor, DM demodulador, PC computador para el registro de los datos

## Estación sísmica con telemetría analógica

El presente diseño corresponde a una estación sísmica tradicional con telemetría analógica en frecuencia modulada, compatible con líneas telefónica o enlaces radio (generalmente en VHF/UHF). En su diseño se han utilizado componentes de bajo consumo, para poder trabajar con fuentes de alimentación de capacidad limitada. Los componentes seleccionados son todos ellos de uso común y bajo coste, ello facilita el mantenimiento por parte de los técnicos locales. La utilización de elementos de precio más elevado no mejora apreciablemente sus características. Ello es consecuencia de la limitación impuesta por la telemetría analógica en el margen dinámico del conjunto. En aplicaciones en climas extremos es conveniente seleccionar los componentes entre los disponibles en las gamas militar o industrial. Es importante cuidar que el conjunto quede bien protegido de la humedad y del agua. Al utilizarse selladores debe comprobarse que estos no ataquen a las soldaduras o a los conductores. Cuidado con algunos tipos de siliconas.

Para mayor claridad, el circuito actual se ha diseñado para un geófono tradicional electromagnético de 1 Hz aunque puede utilizarse también un sistema de respuesta extendida. Las limitaciones en el rango dinámico impuestas por la telemetría analógica no hace recomendable la utilización de estos enlaces con sismómetros de banda ancha. Los componentes pasivos corresponden a una de las versiones realizadas, es conveniente recalcularlos para adaptarlos a las condiciones particulares de cada aplicación. La estación sísmica con telemetría analógica esta constituida por dos unidades, la primera de ellas corresponde al equipo de campo y la segunda al sistema de recepción de la información y por ello suele disponerse habitualmente en el observatorio o centro de registro.



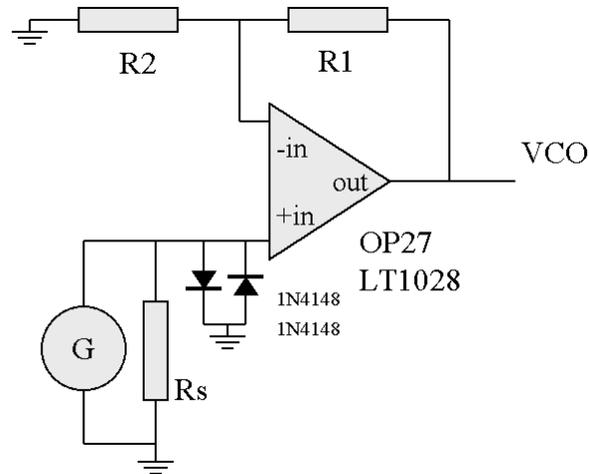
**Figura 10-17.** Diagrama bloque de un sistema de telemetría sísmica analógica. Parte correspondiente al equipo de campo. G geófono. AMP amplificador. MOD modulador. FA fuente de alimentación.

### Sistema de campo: amplificador y modulador

En la unidad de campo puede dividirse en varios módulos independientes

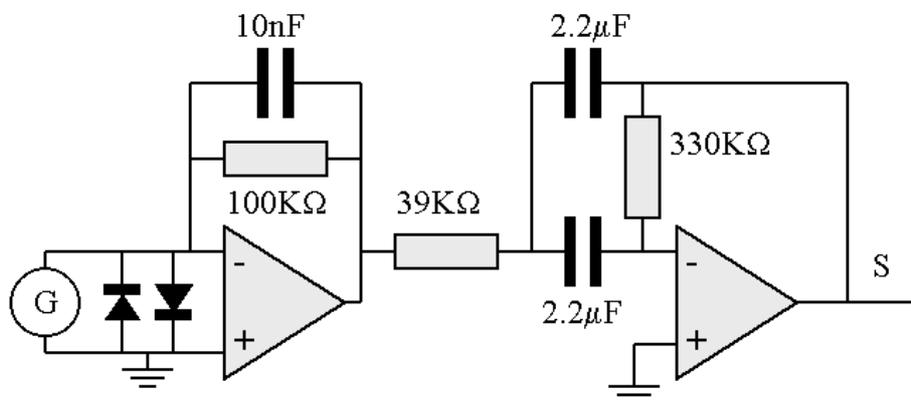
- Geófono, en este caso se utiliza un geófono electromagnético de 1Hz.
- conjunto de amplificadores y filtros
- Modulador, circuito que pasa de una señal de amplitud variable a una señal de frecuencia modulada.

- Fuente de alimentación, genera todas las tensiones necesarias para el equipo partiendo de una fuente externa de 12v.
- Línea de transmisión (conexión mediante par de cables trenzados, línea telefónica, transmisor VHF o UHF, etc)



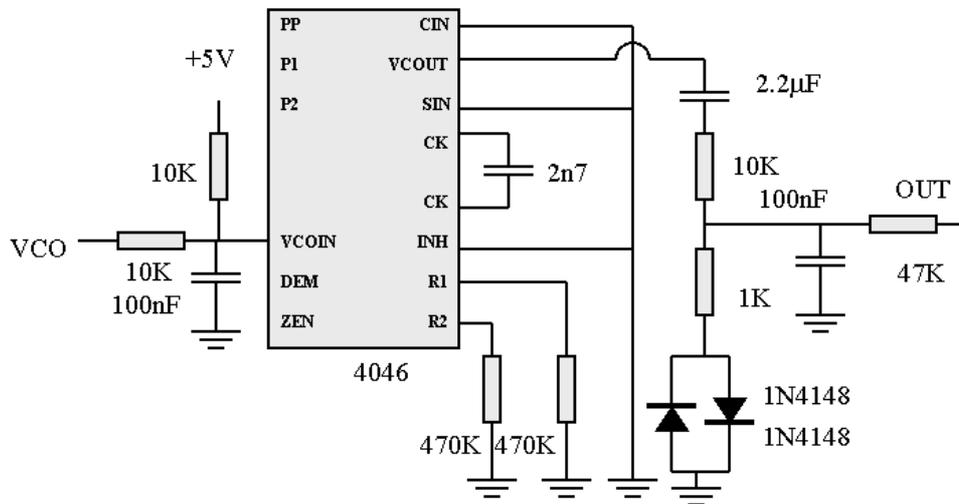
**Figura 10-18.** Amplificador para un sensor electromagnético de 1 Hz. G geófono. Rs resistencia de amortiguamiento. R1 y R2 resistencias para ajuste de la ganancia ( $A = 1 + R1/R2$ )

El preamplificador propuesto utiliza un amplificador operacional de bajo ruido como el OP27 o el LT1028 (preferible con geófonos de resistencia de la bobina menor a 1 K $\Omega$ ). Se incluye una resistencia para conseguir un valor de 0.7 en el amortiguamiento del geófono. La entrada se ha protegido contra valores excesivos de la señal mediante dos diodos. La ganancia del circuito es  $1 + R1/R2$ . Para R2 es conveniente seleccionar un valor del orden de la resistencia aparente del geófono (resistencia de la bobina del sensor en paralelo con la resistencia de amortiguamiento). Para un geófono L4C la resistencia R2 puede ser 2.2 K $\Omega$  y la ganancia del orden de 30, lo que sugiere para R1 un valor normalizado de 68 K $\Omega$ . Si se desea poder ajustar la ganancia se puede sustituir R1, R2 por una red R-2R o bien incluir un conmutador que permita seleccionar varios valores para R1.

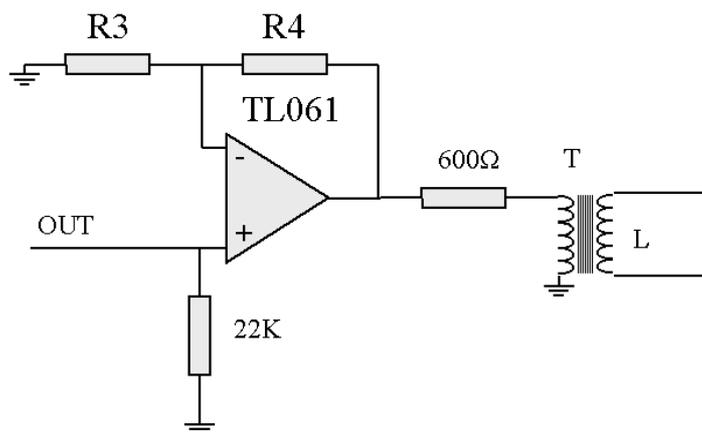


**Figura 10-19.** Amplificador un geófono G de 4.5 Hz. con respuesta extendida. S salida. La ganancia se ajusta variando la resistencia del operacional de entrada. Debe ser de bajo ruido como LT1028 o OP27. El operacional de salida es un TL061 o LF155 de alta impedancia de entrada.

Otra posibilidad es utilizar un geófono de respuesta extendida como los vistos en el capítulo dedicado al estudio de los distintos tipos de geófonos. En este caso la salida del circuito ampliación de respuesta presenta suficiente nivel para excitar convenientemente la entrada del modulador. Es importante tener en cuenta que en muchas ocasiones se dispone todo el sistema en muy poco espacio, por ello cabe la posibilidad de que la señal de radiofrecuencia del transmisor entre por los cables del geófono originando un mal funcionamiento del preamplificador. No existen reglas generales, aunque lo más eficaz es dotar a todo el sistema de un adecuado blindaje, colocar el preamplificador lo más cerca posible del sensor y utilizar cables blindados. Además, es conveniente disponer de filtros de radiofrecuencia en las entradas y salidas del preamplificador, incluidas las correspondientes a las líneas de alimentación.



**Figura 10-20.** Oscilador controlado por tensión (VCO). La entrada VCO debe conectarse a la correspondiente la salida del amplificador. Obsérvese el circuito integrador – recortador utilizado para obtener una señal aproximadamente sinusoidal a partir de la onda cuadrada proporcionada por el 4046.



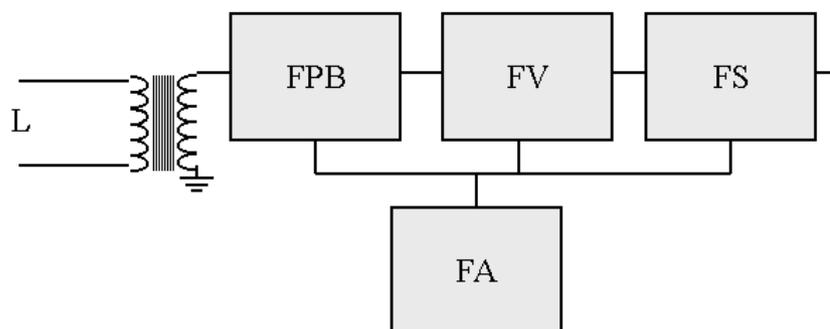
**Figura 10-21.** Adaptador para línea telefónica. La amplitud de la señal se ajusta mediante R3 y R4. Valores tentativos 1 KΩ para R3 y 4.7 KΩ para R4.

El oscilador controlado por tensión (VCO) utiliza un circuito CMOS 4046 cuya frecuencia de oscilación está determinada por el condensador de 2.2 nF y las dos

resistencias de 470 K $\Omega$ . La entrada se polariza a V/2 mediante un divisor resistivo formado por dos resistencias de 10 K $\Omega$ . Se incluye un condensador de 100 nF para limitar la respuesta en altas frecuencias. El 4046 proporciona a la salida una señal cuadrada que se convierte a una señal casi sinusoidal mediante un proceso de integración (conversión a una señal triangular) y posterior recorte mediante dos diodos. La señal obtenida es suficiente para poderse utilizar directamente en la mayoría de los transmisores de VHF. Para su conexión a un línea telefónica deberá incluirse un amplificador con salida mediante transformador a 600  $\Omega$ . Este circuito también puede ser necesario para atacar transmisores con baja impedancia de entrada.

El consumo de todo el conjunto es muy pequeño, del orden de 10 mA, por lo que se puede alimentar con una pequeña batería, un conjunto de pilas secas o directamente a partir de la línea telefónica. Cuando se utiliza el sistema con un enlace radio (VHF o UHF) hay que tener especial cuidado con la toma de tierra, ya que es muy fácil que se produzcan acoplamientos no deseados entre la señal de radio y los circuitos de entrada del preamplificador. A veces disponer un pequeño condensador (100pF) en paralelo con las dos entradas (+in y -in) del chip correspondiente al preamplificador es suficiente. También hay que incluir filtros de alta frecuencia y desacoplar con condensadores los cables de alimentación. En general, es mejor no utilizar amplificadores que presenten un ancho de banda grande, ya que es más fácil que la señal de radiofrecuencia sea también amplificada.

El modulador no está compensado en temperatura, las derivas que suelen presentarse se compensan manualmente reajustando el circuito demodulador. Se ha preferido esta solución para mantener el equipo de campo lo más sencillo posible y con el menor coste. Esta deriva puede plantear problemas cuando se pretende mezclar varias estaciones sobre un mismo canal telemétrico. Todo el conjunto puede montarse en una sola placa de circuito impreso y colocarla en una pequeña caja hermética que lo proteja del agua y la humedad. Los conectores igualmente deben estar a prueba de intemperie. En ocasiones caja y conectores suponen un desembolso mucho mayor que toda la electrónica, en estos casos es posible utilizar conectores de bajo costo y encerrarlo todo dentro de una caja de plástico del tipo utilizado como nevera. Las entradas de los cables se pueden sellar con silicona.

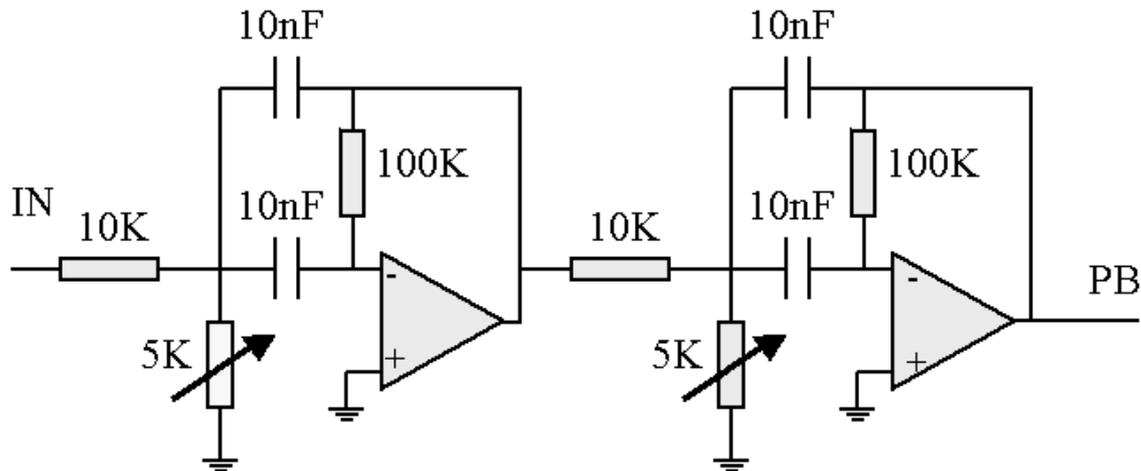


**Figura 10-22.** Diagrama bloque de un sistema de telemetría sísmica analógica. Parte correspondiente al sistema de recepción. L línea de entrada. FPB filtro pasa banda. FV demodulador. FS filtro de salida. FA fuente de alimentación.

## Demodulador

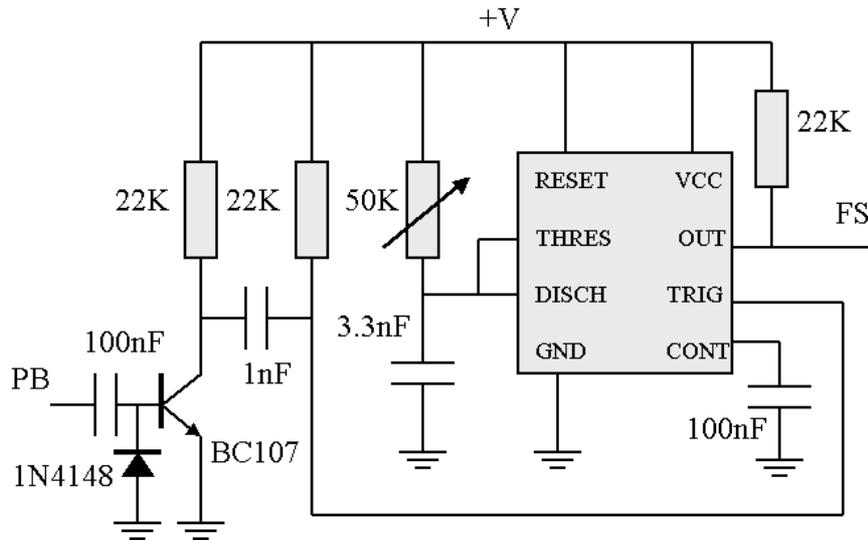
La unidad de demodulación es más compleja, pues debe estar previsto que la recepción de la señal procedente de la estación de campo sea muy defectuosa, presentando una relación señal ruido bastante baja. Al igual que en la unidad de campo, en el sistema de demodulación podemos distinguir también varios módulos independientes

- línea de transmisión (conexión mediante par de cables trenzados, línea telefónica, receptor VHF o UHF, etc)
- sistema de filtros para mejorar la señal portadora, en general deben ser filtros sintonizables para permitir trabajar con varias portadoras sobre el mismo canal.
- circuito demodulador. Utiliza un integrador de pulsos de duración constante.
- filtros de salida: eliminan los restos de la portadora de audio, limitan la banda de paso a la respuesta del geófono y al equipo de registro utilizados.
- señal de salida.
- fuente de alimentación, genera todas las tensiones necesarias para el equipo partiendo de una fuente externa de 12v.

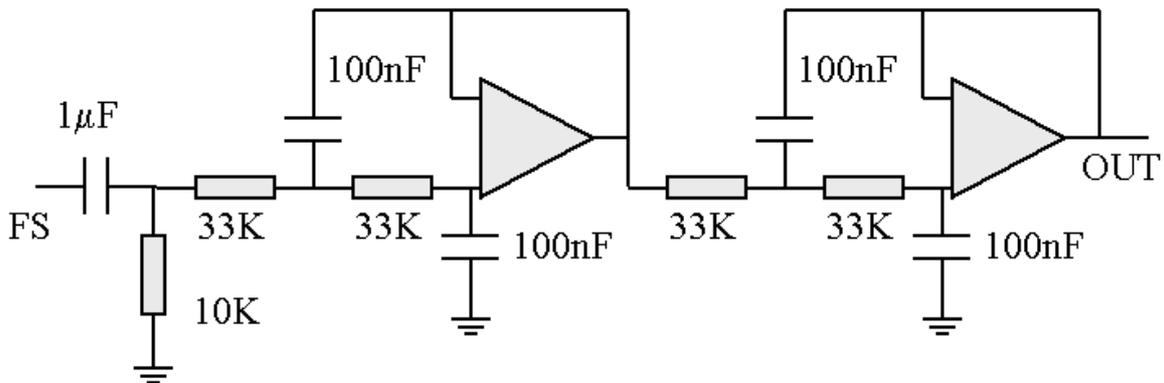


**Figura 10-23.** Circuito de los filtros pasa banda. El ajuste a la frecuencia nominal del canal se consigue mediante los potenciómetros de 5 K $\Omega$ . Los valores se han calculado para sintonizar un canal de 1024 Hz. Para trabajar a con canales más altos habrá que modificar los condensadores de 10 nF.

La entrada se hace por transformador para evitar problemas de masas y permitir la conexión a baja impedancia del receptor o línea telefónica. La selección del canal se realiza mediante un filtro pasa banda convencional de dos etapas. Estos filtros son muy estables y fácilmente sintonizables. En algunas circunstancias puede ser necesario incluir alguna etapa más de filtro. El conversor frecuencia tensión es del tipo integración de pulsos de duración fija. Se ha elegido este sistema por ser el más estable frente a perturbaciones en la señal de entrada, aunque presente una peor respuesta frente a sistemas del tipo PLL (enganche en fase).



**Figura 10-24.** Conversor frecuencia tensión. Se utiliza un integrador de impulsos de duración fija. El monoestable realizado con un circuito NE555 genera un pulso constante para cada flanco descendente de la señal de entrada. El filtro de salida integra estos pulsos y recupera la señal original.



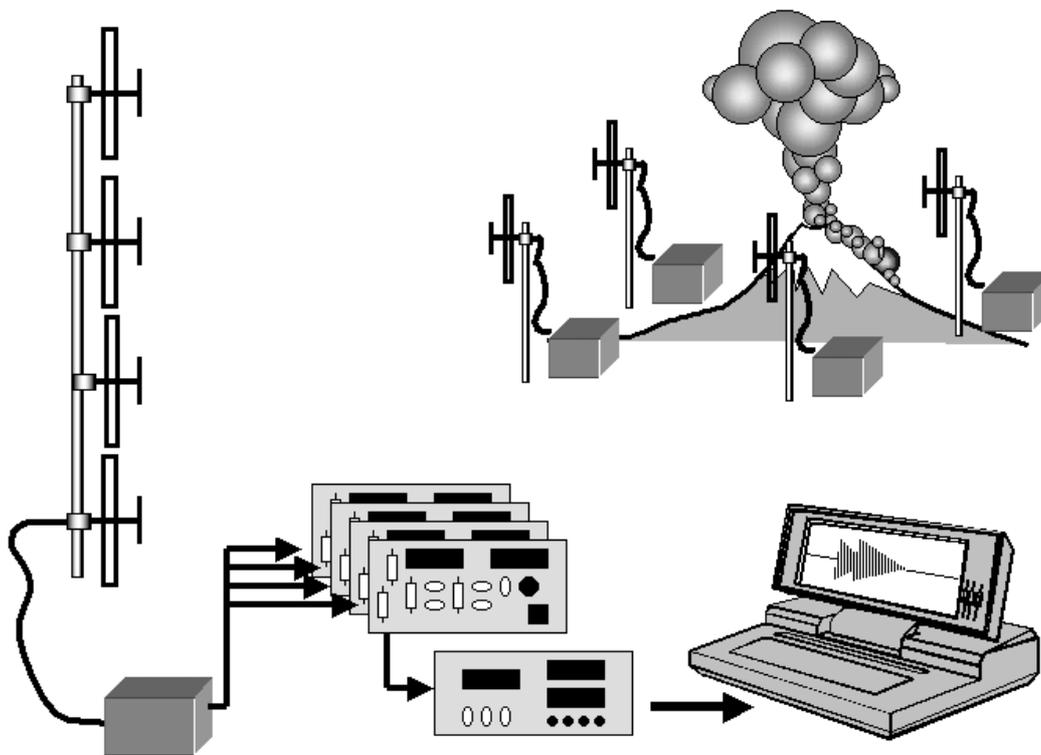
**Figura 10-25.** Filtro pasa bajos de salida. Se trata de un montaje clásico de un filtro de cuatro polos. Es suficiente para la mayoría de las aplicaciones.

El ajuste de los moduladores y demoduladores debe hacerse por parejas, ya que siempre existen diferencias entre los distintos moduladores y no está previsto ningún método para cambiar la frecuencia de la portadora que el cambio directo del condensador que controla el oscilador del 4046.

- conectar el modulador al correspondiente demodulador.
- el ajuste de los filtros pasa banda se realiza con la ayuda de un osciloscopio. Se trata de obtener la máxima salida en cada uno de las etapas de filtro, cuidando de no sintonizar un armónico.

- el generador de pulsos del demodulador se ajusta mediante el potenciómetro del circuito 555, para conseguir una onda cuadrada lo más simétrica posible cuando la señal de entrada corresponde a la frecuencia nominal del canal.
- conectar un oscilador de baja frecuencia a la entrada del modulador. Aplicar una señal del orden de 1Hz. Y comprobar que el sistema funciona correctamente.

Durante el ajuste es importante que no se saturen las primeras etapas del filtro pasa banda. Para ello se puede intercalar provisionalmente una resistencia en serie con la entrada. El montaje del sistema de demoduladores se realiza sobre un bastidor Eurocard DIN160 que permite un cómodo montaje de observatorio. Los circuitos del demodulador están concebidos para operar con 8 canales. La selección del canal de entrada y de salida es independiente y se realizan mediante microinterruptores. Para aplicaciones especiales se ha previsto una entrada directa al sistema de filtros de salida.



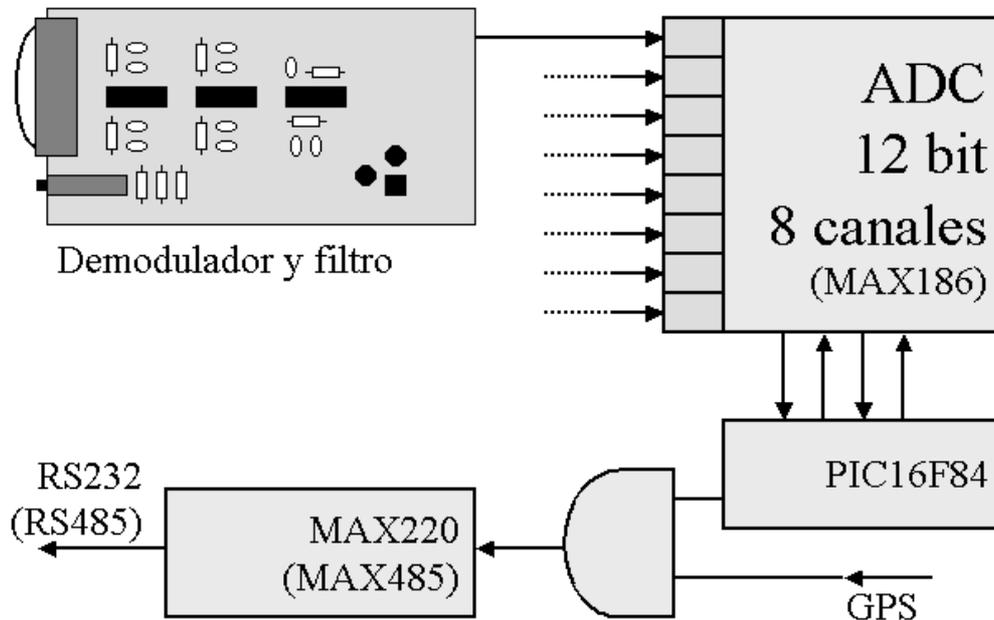
**Figura 10-26.** Red sísmica centralizada con telemetría analógica y registro digital. A la salida del sistema analógico hay que añadir un conjunto de filtros (o modificar los existentes), un convertor analógico digital con suficiente número de canales de entrada y un computador.

### Red sísmica analógica con registro digital centralizado

Trataremos el caso de una red sísmica con telemetría analógica y registro digital. Hoy en día esta es la configuración más habitual de red sísmica en tiempo real. Sin embargo, los sistemas de transmisión digital están desplazando rápidamente a los sistemas analógicos en todos los nuevos diseños y siendo recomendable ir sustituyendo los enlaces analógicos por sistemas digitales. Una red sísmica con telemetría analógica y

registro digital permite operar satisfactoriamente con 12 bits de resolución efectiva y muestreos de 50 o 100Hz sobre cada canal sin ninguna dificultad. Muchas de estas redes son simplemente la transformación de la red sísmica clásica de registro gráfico a la que se le ha añadido un conversor analógico digital y un computador. Este tipo de transformaciones pueden hacerse hoy a muy bajo costo y suponen una mejora muy importante en la calidad de los registros obtenidos en el observatorio, pudiéndose realizar estudios que resultan imposibles de abordar con el sistema analógico.

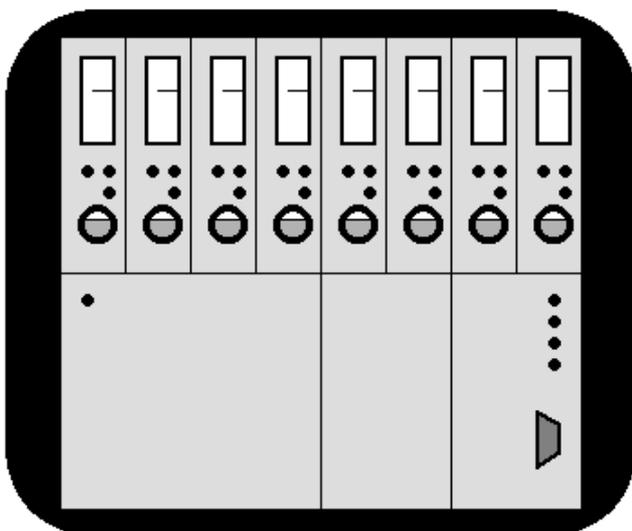
La red sísmica centralizada parte de una red sísmica con telemetría analógica, en la que cada estación de campo consta de geófono, preamplificador y enlace telemétrico por radio o teléfono. En el centro de registro tenemos el sistema de recepción de la telemetría y de recuperación de la señal, un sistema de filtros. A esta configuración clásica se le debe añadir un multiplexor para poder medir consecutivamente todos los canales (en esta realización está incorporado en el propio conversor) y el conversor analógico digital. Es necesario disponer un sistema de filtros *antia-aliasing* en cada una de las entradas o bien modificar los existentes en el sistema demodulador para limitar la señal por debajo de la mitad de la frecuencia de muestreo. Otra solución es muestrear a mayor frecuencia y posteriormente reducir los datos mediante un filtrado digital. Finalmente un ordenador, generalmente un Pc, sirve para la adquisición de los datos y controla todo el sistema. A esto hay que añadir un sistema de tiempo absoluto, aunque al estar el sistema centralizado y si no se van a intercambiar los registros con datos procedentes de otras redes es suficiente utilizar una escala de tiempo local. El esquema propuesto permite conectar el conversor a un puerto serie RS232 estándar, sin necesidad de que el enlace sea bidireccional.



**Figura 10-27.** La digitalización de un red sísmica con telemetría analógica se realiza mediante un conversor analógico digital de 12 bits y 8 canales de entrada (como el MAX186) controlado por un microcontrolador PIC16F84 y un adaptador de niveles CMOS a RS232 realizado con un MAX220 (o MAX232). Además hay que incluir un multiplexor digital para incorporar la señal de reloj procedente de un receptor GPS en la misma ráfaga serie.

La configuración propuesta se basa en la utilización de un convertor analógico digital de 12 bits y 8 canales de entrada (MAX186), capaz de operar hasta 100KHz de frecuencia de muestreo, con el circuito de muestreo y retención y la referencia de tensión incorporados internamente. Este convertor es suficiente para este tipo de aplicaciones, pues el ruido, distorsión y escaso margen dinámico de la telemetría analógica no justifica el empleo de convertidores de mayor resolución. Se utiliza un microcontrolador (un PIC16F84 es suficiente) para proporcionar todas las señales de control y obtener una salida directamente compatible con el puerto serie del computador. También se incluye el multiplexor digital para incorporar la señal de tiempo GPS:

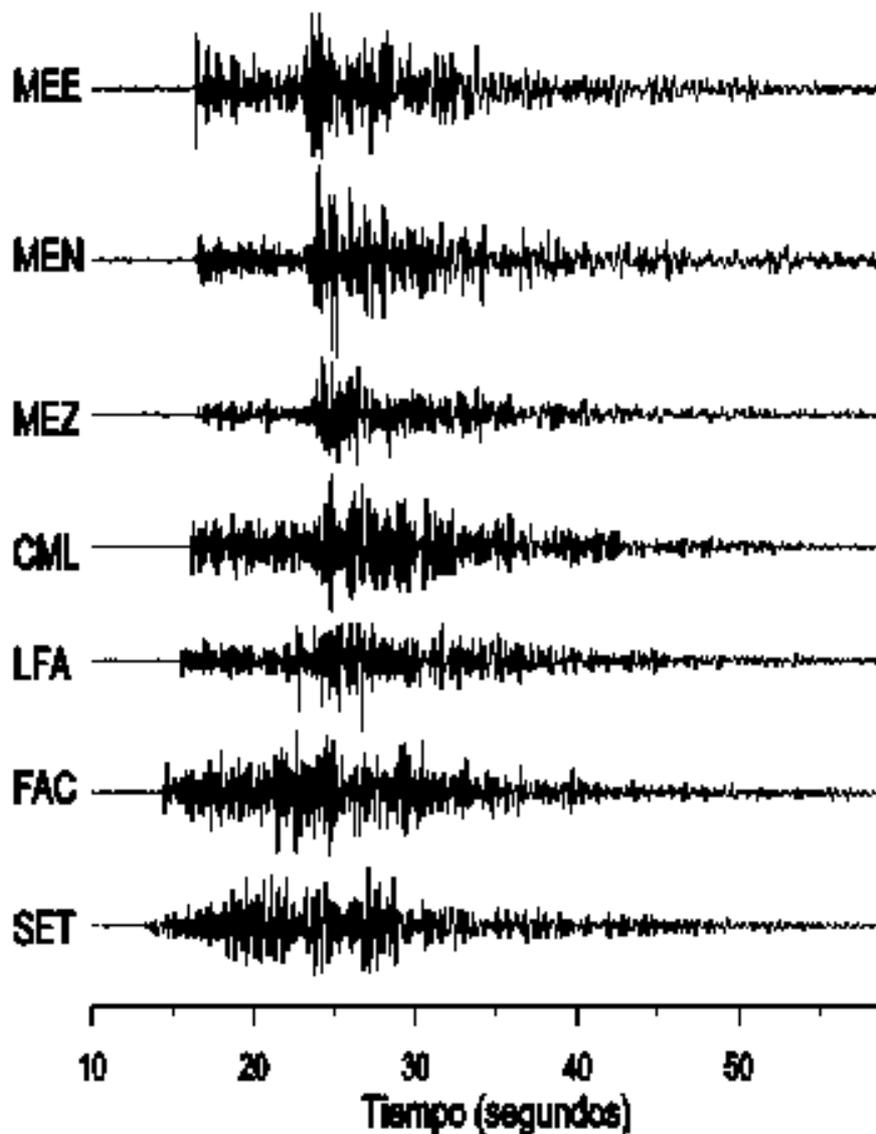
Como en todos los convertidores de alta resolución es necesario que la masa analógica y la masa digital tengan sólo un punto en común y que este sea precisamente el pin correspondiente a la masa analógica del convertor. Igualmente es importante incluir condensadores de desacoplo en las alimentaciones de todos los chips. Esto es especialmente importante en las alimentaciones del convertor. Estos condensadores deben disponerse lo más próximos posible al correspondiente pin. También debe desacoplarse la tensión de referencia. Finalmente, los conductores correspondientes a la señal de entrada no deben circular cerca de señales digitales. Otra fuente de ruido importante es la generada en los propios circuitos integrados del filtro antialiasing debido a que el ruido aumenta considerablemente con la frecuencia y el convertor utiliza un tiempo muy corto para adquirir el dato, por lo que no tiene tiempo de cancelar el ruido al promediar la señal. Para corregir este efecto debe utilizarse un pequeño filtro RC dispuesto lo más cerca posible del correspondiente pin de entrada. Los valores recomendados para operar con frecuencias de reloj del orden de 1MHz son  $220\Omega$  y 10nF. El filtro antialiasing deberá diseñarse para una frecuencia de corte del orden de un tercio o un cuarto de la frecuencia de muestreo. En general, cuando se trata de adaptar una red analógica ya existente al registro digital, suelen servir el mismo sistema de filtros, debiendo sólo incluir un pequeño atenuador o amplificador para adaptar el nivel de señal al requerido por el convertor, tratando de optimizar la relación señal ruido. Es importante cuidar en sistemas FM que la subportadora de audio quede suficientemente atenuada por el filtro, ya que al tener mucha mayor sensibilidad el sistema digital, estas señales parásitas pueden llevar a inhibir la correcta operación del algoritmo de detección.



**Figura 10-28.** El montaje final se hace sobre placas normalizadas DIN160, de modo que pueda disponerse todo el sistema en un módulo doble, con el conjunto de los 8 demoduladores en la parte superior y situando el convertor, la fuente de alimentación y el receptor GPS en la parte inferior. De esta forma disponemos de un sistema compacto fácilmente transportable.

## Realización practica

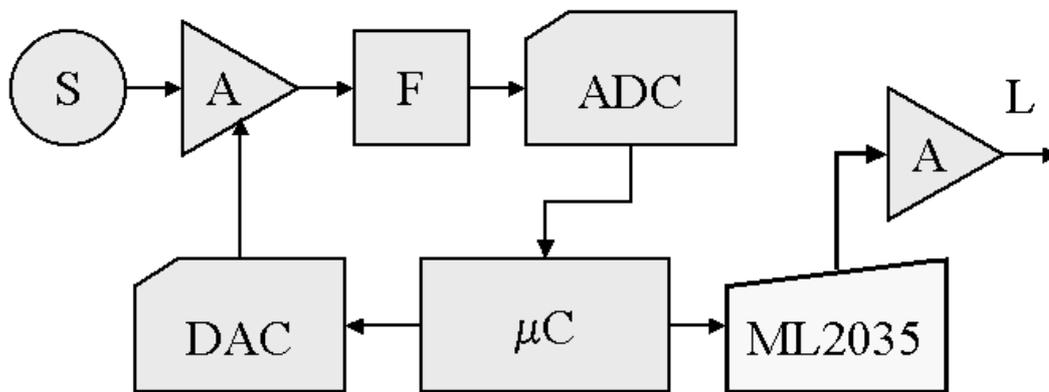
Todo el sistema se ha montado en tarjetas DIN 160x100 a sola cara con conector DIN de 64 contactos en la parte posterior para conexión al BUS de datos. El conversor analógico digital dispone el conector DB9 frontal para su conexión directa al Pc. Los filtros antialiasing se han dispuesto en grupos de ocho en cada módulo. En caso de utilización de telemetría analógica en FM no son necesarios, ya que los propios demoduladores ya limitan suficientemente la banda de paso. La alimentación general se realiza mediante una batería de 12V compartida con el Pc y con un sistema de carga continua. El sistema funciona con todo Pc estándar, aunque es preferible utilizar modelos portátiles, especialmente en zonas donde los cortes de energía eléctrica son frecuentes.



**Figura 10-29.** Ejemplo de registro sísmico obtenido en la red sísmica del Centro de Volcanología de la Universidad de Azores utilizando telemetría analógica y registro sísmico centralizado.

### Otras posibilidades: sistemas híbridos

La telemetría analógica presenta la indudable ventaja de su sencillez, por ello se sigue utilizando en muchos lugares. Sin embargo, el comportamiento de los osciladores controlados por tensión es bastante deficiente, salvo que se utilicen circuitos de compensación muy complicados y que aumentan considerablemente el consumo del sistema. Una solución propuesta recientemente consiste en utilizar un sistema híbrido: la señal se digitaliza y se transmite en frecuencia modulada utilizando un oscilador controlado digitalmente como el ML2035. De esta forma el circuito no resulta demasiado complicado, el consumo se mantiene a niveles razonables y se obtiene una resolución y estabilidad muy superiores, pudiendo utilizarse el mismo sistema de transmisores y demoduladores.



**Figura 10-30.** Sistema híbrido: la señal procedente del sensor S se amplifica A, se filtra F y se convierte a digital mediante un conversor de 12 bits ADC controlado por un microprocesador  $\mu\text{C}$ . El offset se cancela mediante un conversor digital analógico DAC. La señal modulada en frecuencia se obtiene mediante un oscilador sinusoidal controlado digitalmente ML2035

# SISTEMA DE REGISTRO SÍSMICO DIGITAL

## Introducción

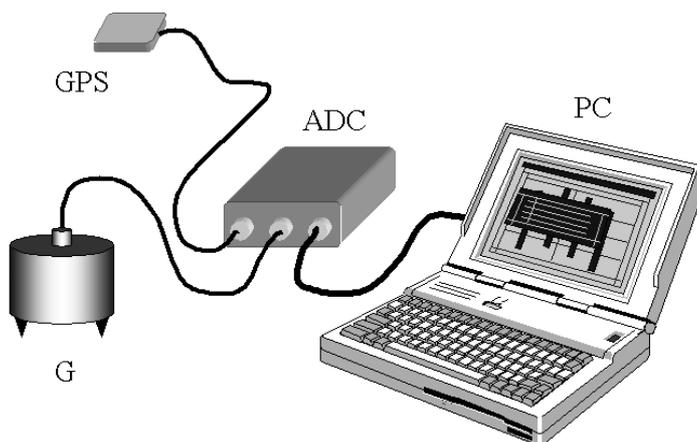
Una estación de registro sísmico digital no plantea hoy ningún problema de diseño, pues hoy existen muchas posibilidades de realizar un sistema de este tipo utilizando elementos habituales en el mercado. En esencia un sistema de registro sísmico consta de los siguientes elementos:

- Sensor.
- Preamplificador.
- Conversor analógico digital.
- Controlador del procesos.
- Sistema de almacenamiento de datos (memoria).
- Sistema de tiempo absoluto.

Los conversores actuales tienen suficiente resolución para no necesitar una amplificación adicional por lo que no suele ser necesario incluir un preamplificador salvo en los casos en los que es necesario modificar la respuesta mecánica del geófono, como es el caso de los sensores de alta frecuencia o de banda ancha.

En general se utilizará un computador convencional para el almacenamiento de los datos, aunque en aplicaciones muy especiales deberemos acudir a otro tipo de dispositivos, llegando incluso a tener que realizar la construcción del sistema de registro, ya que ninguno de los computadores disponibles en el mercado satisfaga nuestras necesidades.

**Figura 11-1.** Estación sísmica con registro digital en su concepción más simple, consta de un geófono (G), un conversor analógico digital (ADC), un receptor GPS y un computador (PC).



## Condiciones de diseño

En el diseño de cualquier instrumento intervienen múltiples factores, aunque aparentemente el único condicionante debiera ser el obtener el mejor registro, eso no siempre puede cumplirse. Algunas de estas condicionantes globales son:

- Operación autónoma o en observatorio.
- Energía requerida.
- Autonomía.

- Peso y volumen.
- Facilidad de operación y mantenimiento.
- Precio.

Después habrá que seleccionar los restantes elementos en función de las características anteriores.

- Sensor (corto periodo, banda ancha, una o tres componentes)
- Resolución del conversor analógico digital (12, 16 o 24 bits).
- Velocidad de muestreo.
- Registro continuo o disparo por eventos.

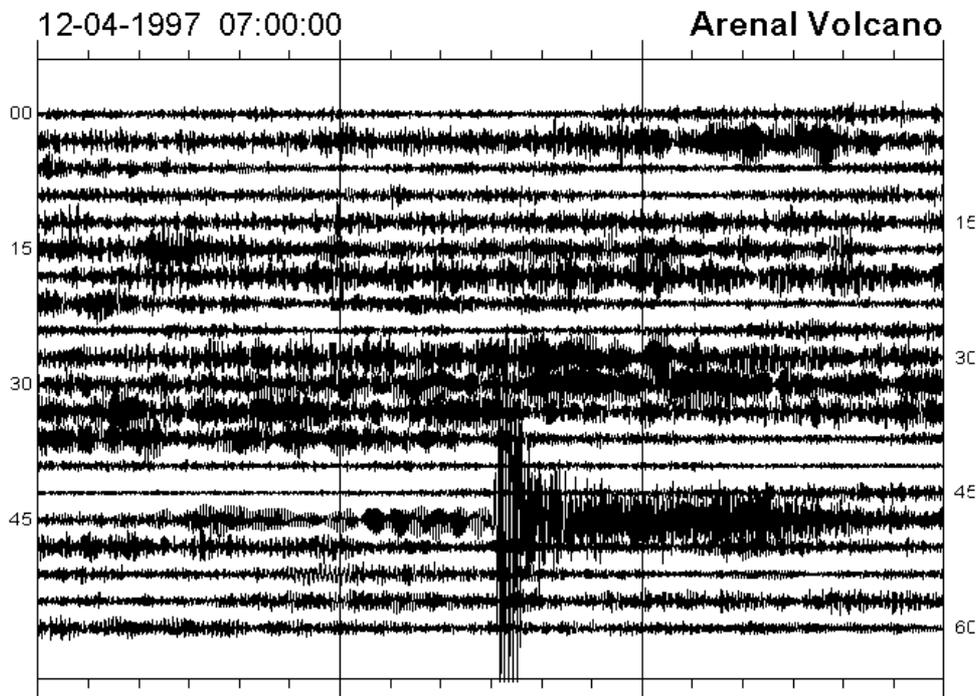
En el estado actual de la tecnología la característica que condicionan todo el diseño es la energía requerida. Existen muchos computadores en el mercado, pero la tendencia ha sido desarrollar máquinas urbanas, aumentando las prestaciones a base de precisar cada vez más y más energía. Y las máquinas pequeñas no están estandarizadas y por ello se hace necesario desarrollar los adaptadores y el soporte informático específico para cada modelo. Además, en muchas de ellas es imposible implementar de forma eficaz un programa de adquisición de datos en tiempo real. En este capítulo se mostrarán diversas posibilidades para el desarrollo de un sistema de registro sísmico apto para el seguimiento de la actividad volcánica.

### **Características de la señal sísmica en áreas volcánicas activas**

El seguimiento de la actividad sísmica es la más antigua de las técnicas de vigilancia de volcanes, desarrollándose ya a principios del siglo XIX los primeros instrumentos para el estudio de los temblores del Vesubio. Hoy, la instrumentación de cualquier volcán empieza siempre por la instalación de un sismómetro, añadiéndose más instrumentación a medida que las posibilidades económicas lo permitan. Del centenar escaso de volcanes instrumentados que existen hoy, sólo unos pocos cuentan con algo más que no sea vigilancia sísmica. Esto se debe a varios factores, en primer lugar el mayor desarrollo que presenta la sismología en todas las Universidades y Centros de Investigación, el menor costo aparente de la instrumentación sísmica y la mayor facilidad para realizar un análisis elemental de los datos obtenidos. Además, al existir más volcanes con instrumentación sísmica, nos encontramos con mayor abundancia de datos, con buenos ejemplos de cómo ha evolucionado la sismicidad antes, durante y después de una erupción. Por consiguiente, cuando se plantea la instrumentación de un nuevo volcán casi sólo se considera la instrumentación sísmica.

La actividad sísmica presente en un volcán activo es difícil de clasificar y depende de cada escuela. En general, la actividad sísmica en un volcán activo, incluso en periodos de reposo, puede ser muy intensa, con una gran cantidad de eventos de poca magnitud (<2) y que suelen presentarse en enjambres. El aumento de la actividad del volcán lleva asociado también un incremento de la actividad sísmica, además de la ocurrencia simultánea de varios tipos de eventos. Incluso durante las fases más activas, los eventos suelen ser de moderada magnitud, aunque en la zona puedan darse eventos de magnitud considerable asociados a otros procesos geodinámicos. La razón de la pequeña magnitud de los eventos asociados directamente con el volcanismo hay que buscarla en la escasa fracción de la energía disponible que puede liberarse como energía sísmica. Hay que tener

también en cuenta que la capacidad de expansión de los gases disminuye con la presión. Ello implica que todos los eventos en los que intervenga la fase gaseosa deben ser superficiales y generalmente sólo registrados por estaciones muy próximas.



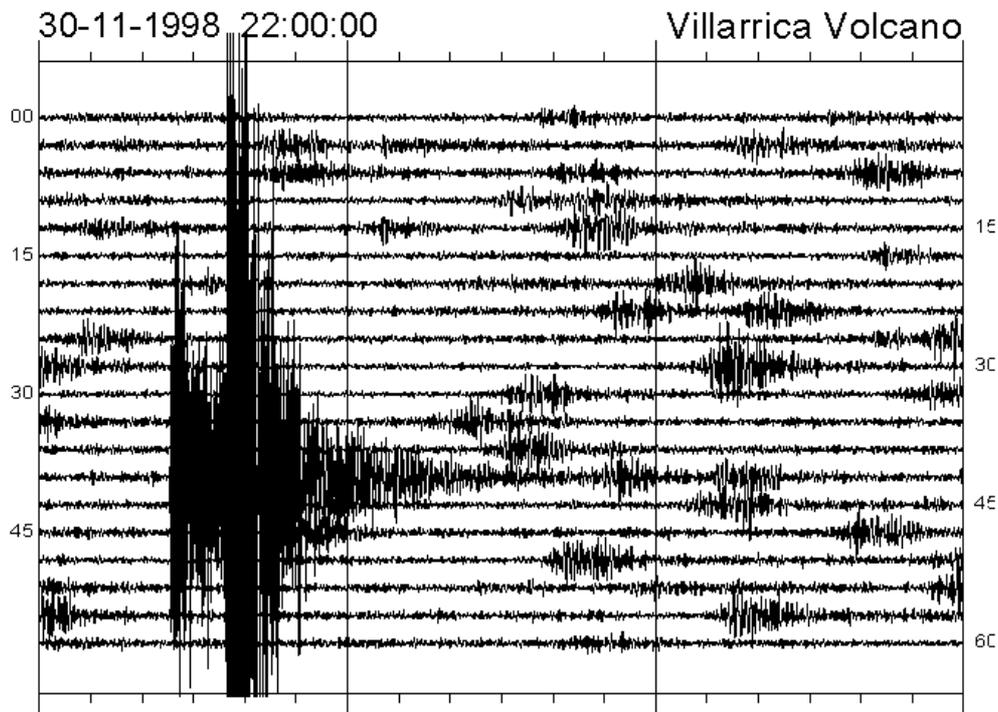
**Figura 11-2.** Ejemplo de actividad sísmica en un volcán activo. Este registro se ha obtenido en el volcán Arenal (Costa Rica). Tiene una hora de duración y en el se pueden observar distintos periodos de tremor y una explosión. Se precisa un sistema de registro continuo para poder estudiar este tipo de señales. Este registro se ha obtenido en la base del volcán mediante un geófono de 4.5 Hz. con respuesta ampliada y un conversor analógico digital de 16 bits operando a 50 muestras por segundo.

La vigilancia sísmica de los volcanes parte por identificar claramente las pautas de la actividad sísmica durante la fase de reposo (línea de base) y controlar cuando esta actividad se va alejando de la línea de base, variando la distribución de los distintos tipos de eventos o la aparición de nuevas familias, así como la relación con otros fenómenos. Las técnicas tradicionales para el análisis de la sismicidad volcánica son la localización de los eventos, la energía liberada o RSAM, el análisis espectral y la estadística del número de eventos.

En algunos volcanes se han podido establecer pautas de evolución de la actividad sísmica en la que se los distintos tipos de eventos se presentan secuencialmente a lo largo de la reactivación del volcán hasta llegar a la fase eruptiva. Estos modelo podemos utilizarlos como orientación en el seguimiento de una crisis, pero nada garantiza que el volcán que estamos estudiando responda de forma parecida. La aplicación de métodos complejos de tratamiento de la señal permite obtener una mayor información a partir de los registros sísmicos. Además del contenido espectral de la señal es necesario conocer las variaciones que experimenta tanto temporales como espaciales.

Por consiguiente, deberemos disponer de sensores en zonas muy próximas al volcán activo para poder registrar las señales de baja amplitud. Estas estaciones deberán funcionar en modo registro continuo, pues muchas de las señales de interés no tienen duración definida, un tremor puede durar horas con amplitud constante o manifestarse como pulsos que se

repiten periódicamente. En general vamos a obtener registros muy ruidosos, ya que las condiciones de instalación sobre el volcán no son siempre las más adecuadas (viento, suelos blandos, ruido cultural, etc).



**Figura 11-3.** Ejemplo de actividad sísmica en el volcán Villarrica (Chile). En este registro de una hora de duración se pueden observar múltiples eventos asociados a la actividad estromboliana del volcán y un sismo tectónico regional. Este registro se ha obtenido con una estación sísmica digital con telemetría radio situada sobre el cono del volcán. La estación está equipada con un geófono de corto periodo (1 Hz.) , conversor de 16 bits operando a 50 muestras por segundo y un enlace radio continuo en VHF con un MODEM a 4800 baudios.

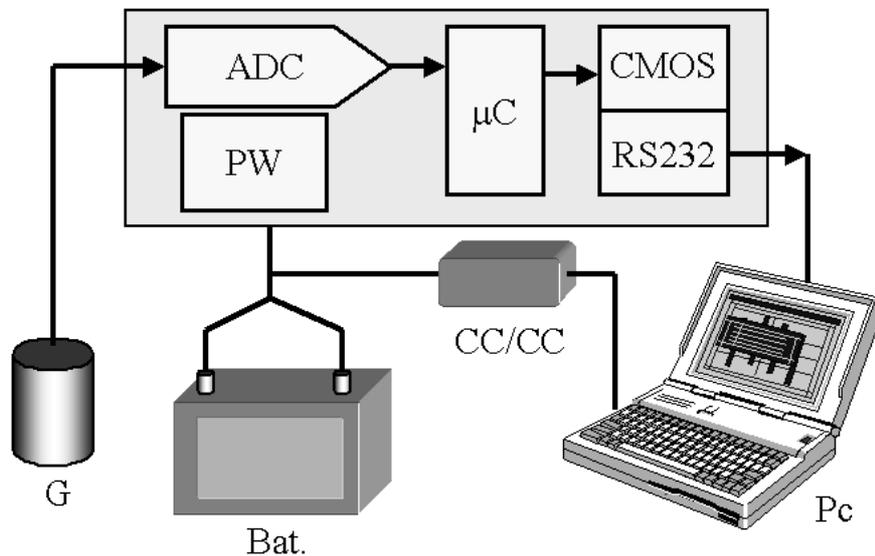
La energía es otro condicionante importante, pues en general vamos a contar con fuentes de energía alternativas (eólica o solar) o una red eléctrica que se cortará en los momentos más críticos. Para poder atender una crisis vamos a tener que disponer de equipos portátiles, que puedan desplegarse fácilmente y ser operados por personal no especialmente cualificado. En muchos casos, los eventos son de tan pequeña amplitud que es imposible correlacionarlos con los registros en otras estaciones. Por ello, y especialmente cuando tenemos una sola estación sobre el volcán es posible prescindir del sistema de tiempo absoluto, lo que permite reducir considerablemente el consumo. Además, para poder tomar decisiones, los datos deben poderse analizar en tiempo casi real. Las condiciones de diseño de un sistema de registro de la actividad sísmica en volcanes activos deben ser:

- Bajo consumo.
- Facilidad de operación.
- Registro continuo.
- Acceso a los datos en tiempo real.

La autonomía dependerá de las posibilidades de mantenimiento del equipo, pero deberemos contar con un mínimo de 24 horas.

## Estación sísmica digital autónoma

El sistema más sencillo consta de un geófono, un convertor analógico digital y un computador para el almacenamiento de los datos. Este sistema puede completarse con



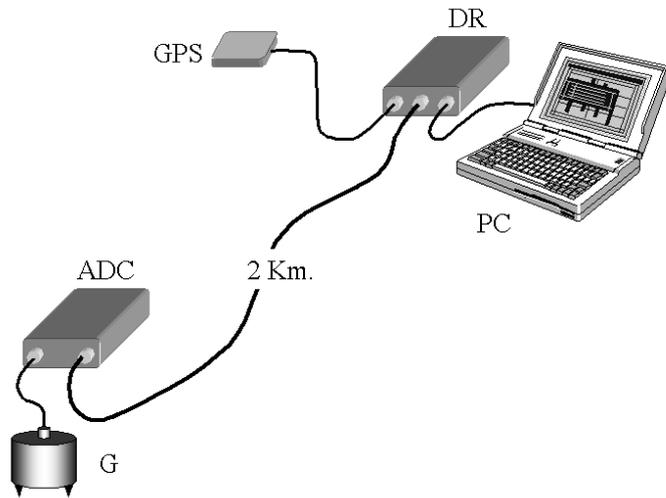
un receptor GPS para proporcionar una referencia temporal absoluta al registro sísmico.

**Figura 11-4.** Una estación sísmica autónoma está compuesta por un geófono, preferentemente de alta frecuencia con respuesta extendida (G), un módulo de adquisición de datos formado por un convertor analógico digital (ADC), un microcontrolador ( $\mu\text{C}$ ) que gestiona el convertor y formatea los datos según un formato estándar, un convertidor de nivel (CMOS/RS232) para su adaptación al puerto serie del computador (Pc) y una fuente de alimentación (PW). Una batería alimenta a todo el conjunto, precisando de un adaptador (CC/CC) para el computador. Es conveniente incorporar un receptor GPS para disponer de una referencia de tiempo absoluta..

La primera cuestión a decidir es si se trata de un equipo portátil o un equipo que va a operar siempre en un local (observatorio, colegio, puesto de policía, guardia forestal, etc.) con energía más o menos garantizada. En este segundo caso podemos utilizar un computador se sobremesa, en caso contrario se deberá elegir un computador portátil. Seguidamente se trata de elegir el tipo de geófono que equipará el sistema, puede ser un sensor de corto periodo, un geófono de alta frecuencia con expansión electrónica de respuesta o un sismómetro de banda ancha y en todos los casos si deseamos una o tres componentes. Con ello ya se está en condiciones de elegir el tipo de convertor analógico digital: En función de si el sistema es de una o tres componentes deberemos elegir un convertor de uno o de tres canales (o dejar dos canales inoperantes) y si se trata de un sismómetro de banda ancha deberemos elegir preferentemente un convertor de 24 bits, mientras que para los otros sensores será suficiente uno de 16 bits. En casos donde el consumo sea un condicionante muy fuerte, deberemos acudir a un convertor de 12 bits. Para poder operar con cualquier sistema es conveniente elegir un convertor analógico digital de tipo serie, para poder utilizar el port serie estándar del computador. El tamaño de disco disponible (o memoria en equipos ligeros) se evalúa de acuerdo con la resolución del convertor y la frecuencia de muestreo:

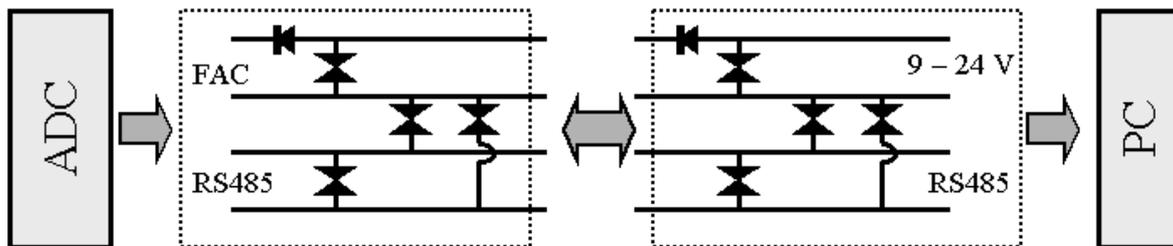
$$\text{Bytes} = 24 * 60 * 60 * \text{Hz} * R * C$$

Donde *Bytes* es el número de Bytes necesarios por día de registro, *Hz.* la frecuencia de muestreo, *R* la resolución (2 para 12 o 16 bits, 3 para 24 bits) y *C* el número de canales. Como ejemplo, un sistema de un canal y 16 bits, operando a 50 Hz. genera 360.000 Bytes por hora, es decir 8.640.000 Bytes al día.



**Figura 11-5.** Estación sísmica con telemetría cable. Se utiliza un estándar RS485 que permite establecer de forma sencilla conexiones a alta velocidad hasta 2 Km. La estación esta formada por un geófono (G), el módulo con el convertor analógico digital y transmisor RS485 (ADC), el receptor RS485 (DR), un sistema GPS y un computador (PC). Necesariamente hay que proteger de transitorios de alta tensión las entradas y salidas de la línea de transmisión.

En caso de elegir un computador portátil es importante disponer de un adaptador que permita alimentarlo a partir de una batería estándar de 12 V. Hay que tener en cuenta que la mayoría de los computadores portátiles requieren 15 o 17 voltios externos. Se puede utilizar una fuente conmutada, pero hay que tomar precauciones ya que puede entrar en conflicto con la fuente conmutada interna del computador. Disponer un diodo y un condensador de gran capacidad entre el computador y la fuente puede ser una solución. Hay que proceder con extrema precaución para evitar destruir el computador.

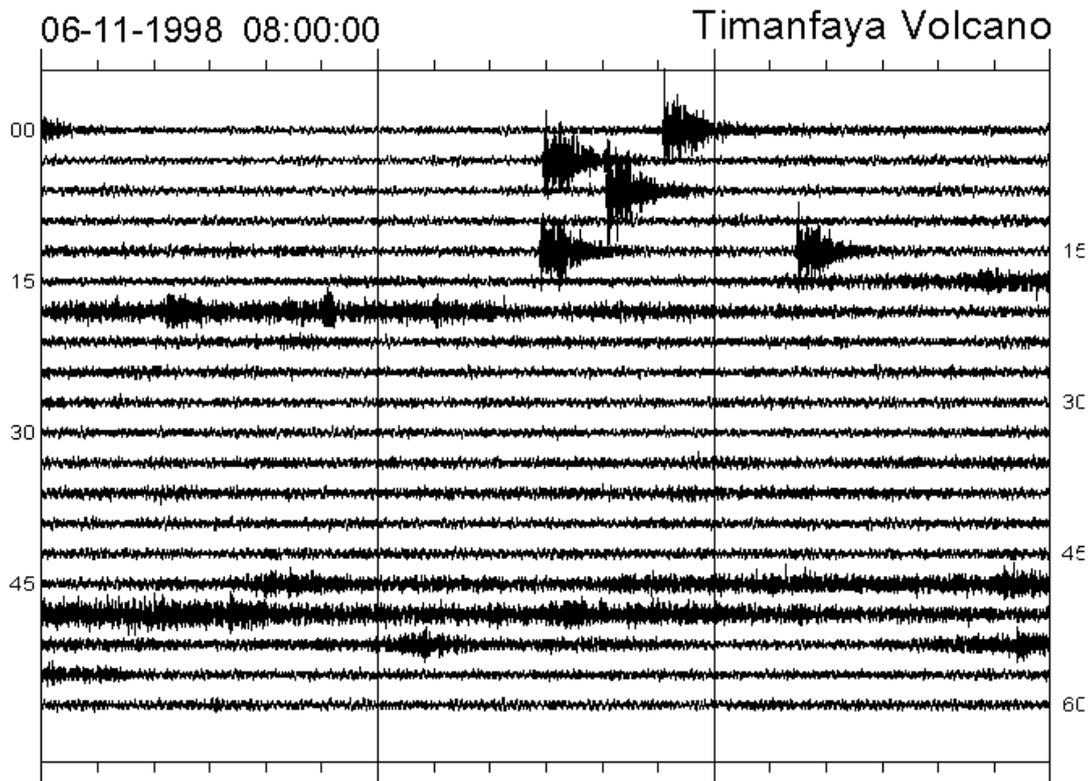


**Figura 11-6.** Protección mediante diodos supresores de una conexión remota mediante cable de un convertor analógico digital (ADC) y un computador (PC). Obsérvese que al utilizar el estándar RS485 un par diferencial es necesario proteger ambas líneas con respecto a masa y entre ellas. Además se incluyen dos diodos contra inversiones de polaridad. En caso de que se utilizara un enlace bidireccional se debería utilizar idéntica protección en las dos líneas.

### Sistema de registro sísmico con telemetría cable

En muchas ocasiones el sistema de registro se encuentra situado en una zona con elevado ruido cultural, precisándose alejar los sensores unos centenares de metros. La solución más sencilla es utilizar un cable de cuatro conductores, dos para la alimentación y dos para la señal. Se utiliza un enlace RS485 que permite alcanzar

velocidades de comunicación muy elevadas hasta 2 Km. de distancia. Esta realización no plantea ninguna dificultad y es una buena solución para montar un equipo sísmico en muchos emplazamientos, de forma que el sensor se puede disponer en una zona de bajo ruido. Además, el estándar RS485 es muy tolerante con respecto al tipo de cable a utilizar, por lo que pueden usarse cables telefónicos o de alumbrado sin ningún tipo de problemas. La única precaución que hay que adoptar es proteger adecuadamente las entradas y salidas de la línea de transmisión, pues cualquier transitorio puede destruir los circuitos integrados que se utilizan para generar las señales RS485. Para ello se pueden utilizar diodos especialmente diseñados para suprimir picos de alta tensión.



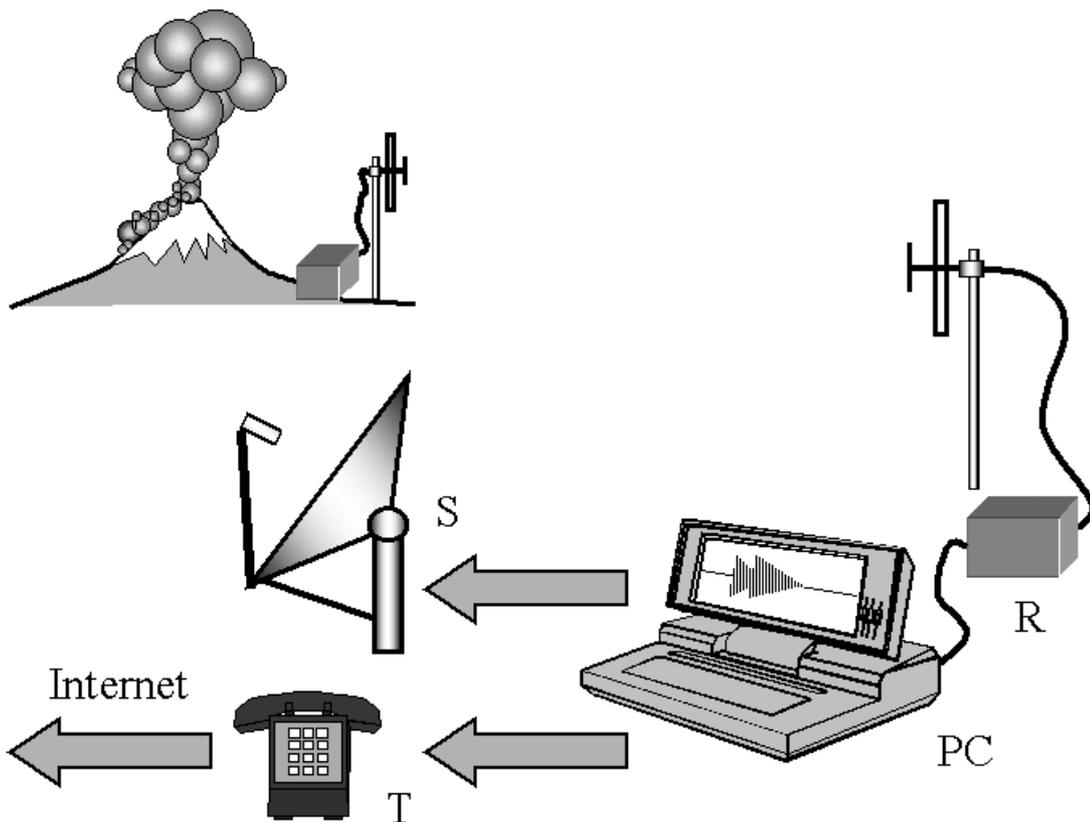
**Figura 11-7.** Registro de la actividad sísmica de Timanfaya obtenido mediante un geófono de corto periodo (1 Hz.) con un convertor de 16 bits operando a 50 muestras por segundo. El sistema de registro se encuentra en un laboratorio situado a más de 500 m de distancia del convertor al que se encuentra unido mediante un cable de cuatro conductores y utiliza un enlace RS485.

Es importante disponer de sistemas de este tipo, ya que presentan una gran operatividad, pues pueden operar con muy poca energía, toleran niveles de ruido electromagnético muy altos y no dependen de enlaces de terceros. Por ello en caso de crisis siempre es conveniente instalar primero una o dos estaciones con enlace por cable, y después ir complementando la instrumentación con otro tipo de dispositivos. De esta forma se garantiza disponer siempre de información con un nivel de calidad razonable.

#### **Sistema de registro sísmico digital con telemetría radio de baja potencia.**

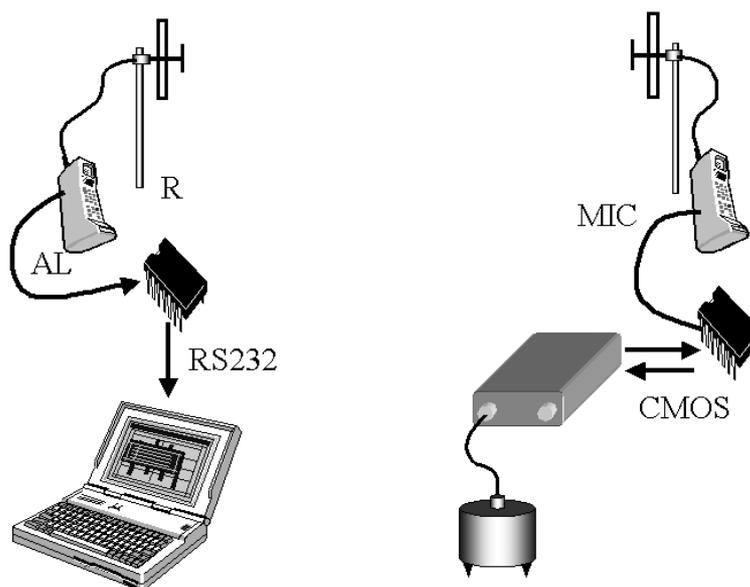
La segunda posibilidad es utilizar un enlace de telemetría radio. Existen varias posibilidades, aunque no todas son aplicables en todos los países debido a las distintas regulaciones del espectro radio-eléctrico. Entre estas posibilidades existe la utilización

de un radio-módem o de un enlace *spread-spectrum*, presentando ambas soluciones el problema de requerir una potencia considerable y de ser de coste elevado. Otra posibilidad es utilizar enlaces radio en VHF o UHF de baja potencia (10 mW) desde la estación a un punto situado en las proximidades del volcán ( a menos de 10 Km.) donde se dispone el centro de registro y comunicaciones y que en caso de crisis puede utilizarse como centro de atención permanente. Este tipo de enlace está liberado en ciertas bandas en prácticamente todos los países y no plantea demasiadas dificultades el utilizarlo en los volcanes activos, ya que son zonas poco habitadas y por consiguiente el espectro no está demasiado saturado. Desde el centro de recepción la señal puede reenviarse hasta el observatorio mediante otro enlace, ahora ya de gran capacidad o utilizar un protocolo FTP a través de Internet.

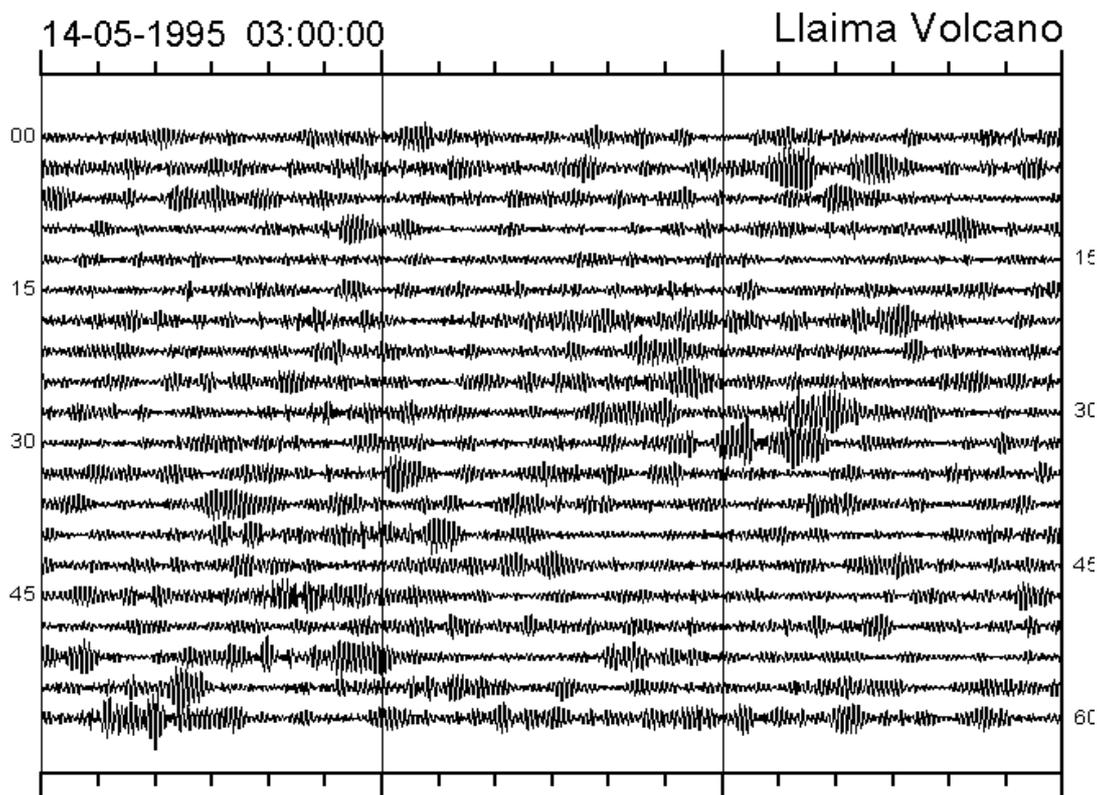


**Figura 11-8.** En muchos casos es suficiente con utilizar un enlace radio digital de baja potencia en VHF o UHF para enviar la señal desde las estaciones situadas sobre el volcán a un observatorio próximo. En ese punto se registran y se envían al centro de proceso de datos mediante un módem convencional y línea telefónica, un enlace dedicado de alta velocidad o satélite. En caso de crisis este observatorio, situado en las proximidades del volcán puede servir de centro de atención permanente.

Actualmente existen en el mercado muchos micro-transmisores digitales en las bandas de VHF y UHF que permiten enlaces a unos pocos kilómetros y velocidades superiores a 4.800 baudios. La utilización de estos transmisores es trivial, pues su entrada es directamente compatible CMOS, aunque en algunos casos habrá que disponer un cambiador de nivel, sobretodo si el transmisor se alimenta a una tensión mayor que la salida del conversor analógico digital. El consumo es muy pequeño, por lo que se puede utilizar un panel solar de reducidas dimensiones, lo que lo hace menos vulnerable al vandalismo. Es importante prestar atención a las antenas, una buena antena, bien instalada y orientada permite garantizar mejores enlaces que una mayor potencia del transmisor.



**Figura 11-9.** En muchas ocasiones la solución más sencilla es utilizar dos radioteléfonos como enlace telemétrico. Para ello incorporamos dos módem monolíticos de 4800 baudios, uno de ellos a la salida del convertor analógico digital y a la entrada del micrófono del radioteléfono (MIC). El otro, a la salida de altavoz (AL) y a la entrada RS232 del computador. En algunos casos deberemos añadir un circuito para adaptación de niveles.



**Figura 11-10.** Registro de una hora de duración de la actividad sísmica del volcán Llaima (Chile). Este registro es un buen ejemplo de la necesidad de realizar registros continuos para el estudio de la sismicidad volcánica. Cortesía OVDAS (Chile).

También pueden utilizarse cualquier tipo de transmisor en las bandas de VHF y UHF como un radio-teléfono o los radio-enlaces utilizados en telemetría analógica, sin más que añadirles un módem adecuado. Teniendo presente el ancho de banda autorizado para este tipo de componente difícilmente se podrá pasar de 4800 baudios, que son suficientes para operar una estación sísmica a 50 muestras por segundo y 16 bits. Como módem lo mejor es utilizar un circuito monolítico como el FX469, pues no se necesitan ninguna de las funciones de establecimiento de llamada ni los protocolos AT de conexión con el ordenador. En algunos casos habrá que eliminar el filtro pasa bajos que llevan incorporados los receptores a la salida del detector (y en algunos casos los transmisores en la entrada del micrófono) para evitar que el desplazamiento de fase que introduce provoque una tasa de errores demasiado grande.

### **Software para el registro de la actividad sísmica**

El estudio de la actividad sísmica asociada a un volcán activo requiere el registro continuo de la señal, pues de otra forma no es posible analizar las largas secuencias de tremor volcánico. El análisis de los eventos aislados se realiza por simple extracciones de los ficheros de datos. Sin embargo, es conveniente disponer de un algoritmo que permita detectar automáticamente la ocurrencia de un evento singular y si es posible proceder a su análisis detallado. El sistema de registro sísmico puede proporcionar otras señales derivadas como el valor medio de la señal (RSAM), de su contenido espectral (SRSAM) o la polarización. También es conveniente que genere resúmenes de la actividad que puedan distribuirse fácilmente.

### **Registro en continuo**

El registro continuo es imprescindible en sistemas de seguimiento de la actividad sísmica de volcanes activos. Existen muchas posibilidades, ya que los computadores actuales tienen sobrada capacidad de memoria. Sin embargo, es importante compaginar el número y tamaño de los ficheros, la velocidad de operación y la pérdida de datos en caso de fallo del sistema. Nuestra experiencia nos indica que un buen compromiso se consigue registrando los datos en ficheros de una hora de duración. Todos los ficheros tienen la misma longitud, tengan o no datos escritos. De esta forma el inicio del fichero corresponde siempre al segundo cero del minuto cero. Cualquier falta de datos se rellena repitiendo el dato anterior cuando sólo falta una muestra o relleno con ceros cuando es un fallo apreciable. En la definición del formato del fichero de datos se ha tenido en cuenta que sea muy rápido de apertura, para simplificar de esta forma el proceso de examen y análisis. Los datos se escriben directamente como enteros de dos bytes en sistemas operando a 16 bits. Para sistemas de 24 bits cada dato ocupa lógicamente tres bytes. Cuando los datos se almacenan por mucho tiempo es posible comprimirlos usando un compresor habitual, como WINZIP o ARJ. En general se consiguen compresiones superiores al 50%. La actualización del fichero se realiza cada minuto cuando se trata de un computador que escribe en el disco o bien cada segundo en sistemas portátiles que escriben en memorias no volátiles. Es necesario que cada vez se abra y cierre el fichero, para evitar la pérdida de todo el bloque de datos en caso de fallo del sistema. De esta forma sólo se pierde el último minuto (segundo). Es conveniente que el sistema de tiempo absoluto (generalmente un GPS) mantenga el sincronismo de

cada segundo, ajustando el número de datos a la frecuencia de muestreo nominal. Es posible multiplexar los datos, pero no es recomendable para más de tres canales, pues los ficheros se hacen inmanejables. Tres canales es una buena opción pues permite una fácil gestión de las estaciones de tres componentes. En otros casos es preferible manejar cada canal por separado. Cuando se desea comprimir los datos es preferible grabar cada canal por separado, pues de esa forma se obtienen mayores tasa de compresión.

### Software para la detección de eventos sísmicos

El algoritmo más sencillo para la detección de un evento sísmico consiste en comparar el nivel de la señal con un umbral de disparo. Sin embargo las fluctuaciones normales del ruido de sísmico hacen que este método sólo sirva para eventos grandes, pues con niveles bajos de disparo se está disparando continuamente.

Una solución a este problema es utilizar un algoritmo consistente en comparar el valor medio de la señal en un intervalo de tiempo corto con el valor típico de señal, obtenido como valor medio en un intervalo de tiempo largo. Este algoritmo es conocido como *LTA/STA*, donde *LTA* es la amplitud media en un intervalo temporal largo que es del orden de 8 a 32 segundos y *STA* la amplitud media en un intervalo temporal corto del que es del orden de 1 a 4 segundos. La implementación del algoritmo puede hacerse de muchas formas, especialmente cuando se dispone de computadores rápidos. La forma más eficaz, capaz de operar en pequeños microcontroladores, define las amplitudes medias *LTA* y *STA* mediante un filtro lineal no recursivo dado por las expresiones:

$$\begin{aligned} LTA &= K_l * LTA + (1 - K_l) * y \\ STA &= K_s * STA + (1 - K_s) * y \end{aligned}$$

donde  $K_l$  y  $K_s$  están relacionadas con las duraciones de cada intervalo.  $y$  es la señal digital sobre la que se definen *LTA* y *STA*. Para mejorar la eficiencia del cálculo, estas expresiones adoptan las formas computacionales siguientes:

$$\begin{aligned} LTA &= LTA + K_l * (y - LTA) \\ STA &= STA + K_s * (y - STA) \end{aligned}$$

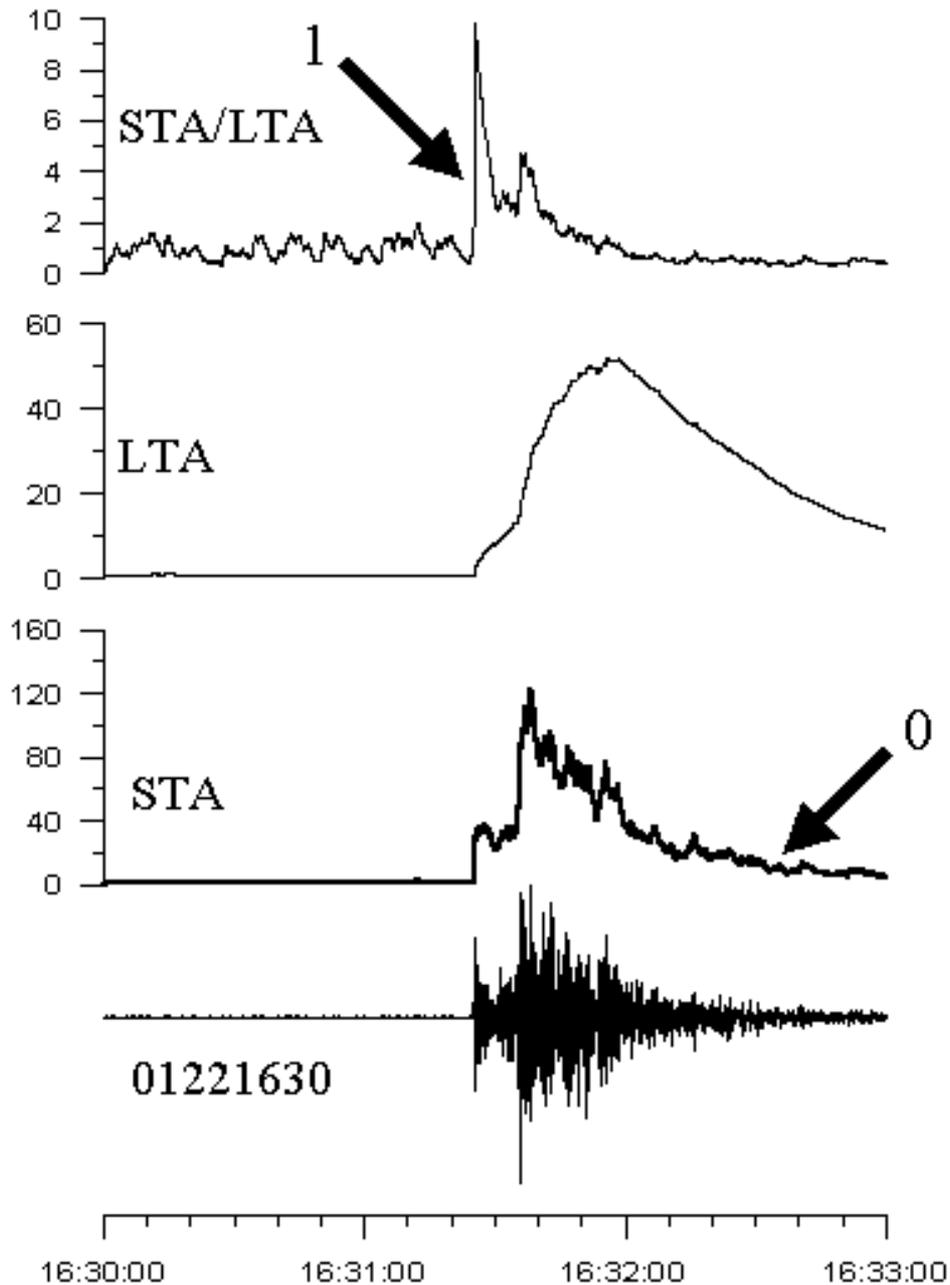
de esta forma es necesario realizar sólo una multiplicación en cada caso. Seleccionando las constantes  $K_l$  y  $K_s$  de forma que sean iguales a  $1/2^n$  y  $n$  entero, estas operaciones en binario equivale a realizar desplazamientos a la derecha de  $n$  bits. La variable  $y$  puede ser el valor absoluto de la señal de entrada (lectura del conversor ADC) o bien el valor absoluto de la variación de la señal de entrada:

$$\begin{aligned} y &= |x_i| \\ y &= |x_i - x_{i-1}| \end{aligned}$$

donde  $x_i$  es la lectura del conversor y  $x_{i-1}$  corresponde a la lectura anterior. La primera expresión corresponde al valor absoluto de la amplitud, mientras que la segunda refleja la velocidad con la que cambia esta amplitud. Estos dos algoritmos son conocidos como *LTA/STA* en amplitud y *LTA/STA* en incremento. El disparo del algoritmo se produce cuando:

$$STA > K * LTA$$

siendo  $K$  la constante de disparo. Para simplificar la operación se elige también una potencia exacta de 2, por lo que es suficiente con desplazar los bits de  $LTA$  a la derecha. Una vez se ha detectado un evento se puede generar un fichero con los datos o emitir un mensaje (UDP) a otra aplicación para realizar un análisis automático del mismo y a su vez emitir un informe.

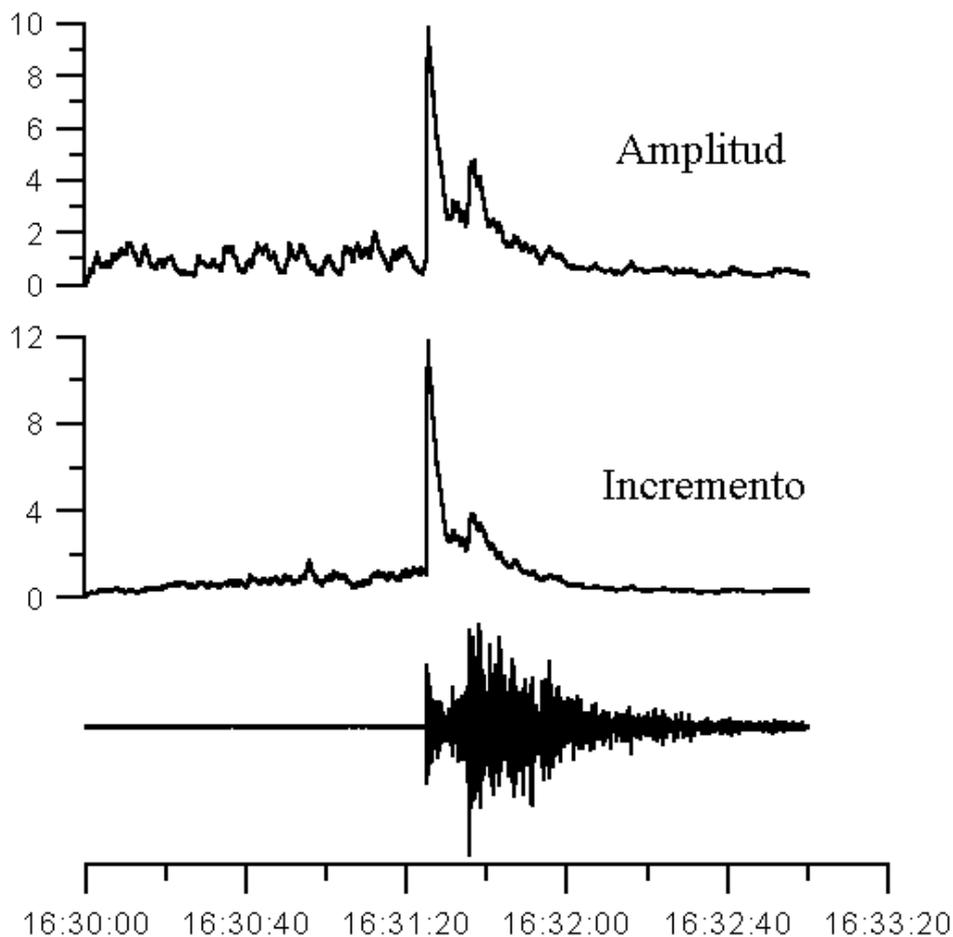


**Figura 11-11.** Se muestra la evolución de las señales STA, LTA y STA/LTA para un sismo tectónico ocurrido en Lanzarote el 22 de enero de 2001. Las flechas 1 y 0 indican el momento en el que se activa y desactiva el disparo. Se ha utilizado una constante de  $1/64$  para STA, de  $1/512$  para LTA y 4 para el disparo y el algoritmo trabaja en modo amplitud.

En el caso de que se desee guardar el evento hay que tener presente que el algoritmo se activa unos segundos más tarde de que el evento haya alcanzado una determinada

amplitud. Por ello es necesario disponer de un almacenar provisionalmente los datos en un fichero circular de suficiente duración para poder tener el principio del evento. La duración de este fichero se denomina *PRE\_EVENTO* y se puede estimar en función de la distancia máxima a la que queremos registrar los eventos. Así, suponiendo que el algoritmo se dispara con una onda S, la duración del *PRE\_EVENTO* debe ser superior a la distancia (en Km.) dividida por 8. En general, para el estudio del volcanismo activo es suficiente trabajar con un *PRE\_EVENTO* de 16 o 32 segundos. El final del registro se puede obtener a partir de la evolución de la señal, por ejemplo esperar que *STA* caiga por debajo del valor que tenía antes del disparo o bien hacer los registros de duración fija. Es conveniente definir siempre una duración máxima para los eventos, pues en caso contrario el sistema puede quedarse registrando indefinidamente. Para ello se definen, además del *PREEVENTO*, la duración máxima *MAX\_EVENTO* y un *POST\_EVENTO*, de forma que la duración del registro varía entre los límites:

$$\text{PRE\_EVENTO} + \text{POST\_EVENTO} <> \text{PRE\_EVENTO} + \text{MAX\_EVENTO}$$



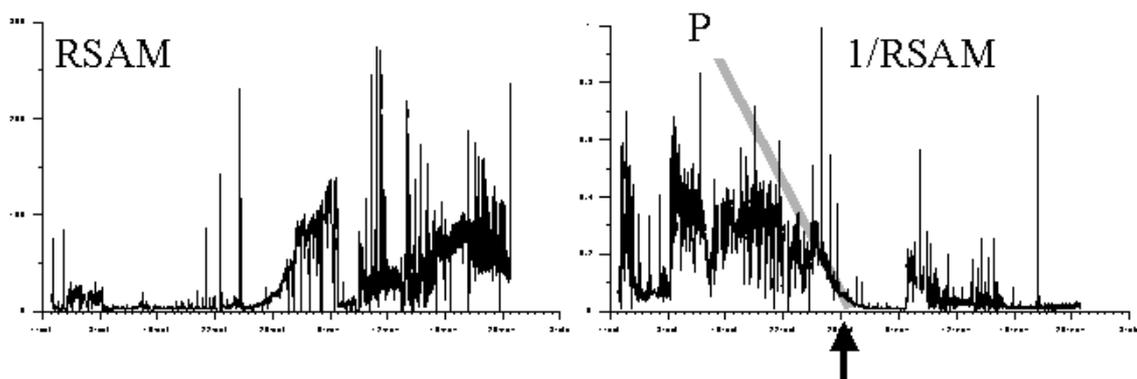
**Figura 11-12.** Comparación de los algoritmos de disparo en amplitud y en incremento. Obsérvese que en este caso el algoritmo en incremento presenta una mejor relación señal ruido. Pero esto no siempre es así, pues depende de las características de la señal y del ruido normalmente presente en la estación.

## Señales derivadas: RSAM

El *RSAM* nació en un momento en el que los computadores no permitían manejar fácilmente el registro sísmico continuo, sustituyéndolo por el valor medio de la amplitud cada cierto tiempo. En realidad, G. Imbo en los años 1940, en el Observatorio Vesubiano introdujo un índice de la actividad eruptiva promediando la amplitud de la señal en los registros de papel ahumado, pues ya se percató de que las señales sísmicas de origen volcánico no pueden analizarse del mismo modo que las señales tectónicas. El *RSAM* se ha convertido en un buen auxiliar para caracterizar a simple vista la evolución de la actividad sísmica de un volcán, permitiendo, en circunstancias favorables, el pronóstico del momento de la explosión. Para poder analizar esta señal es conveniente disponer de una estación de referencia situada alejada del volcán de forma que permita corregir las fluctuaciones del ruido sísmico regional y la ocurrencia de eventos tectónicos lejanos. El *RSAM* es muy fácil de implementar, pues basta con promediar la señal durante un cierto tiempo. La duración del intervalo es cuestión del criterio de cada observatorio, aunque generalmente suele estar comprendido entre tres y diez minutos. En algunas implementaciones se calcula el valor de *RSAM* para tres intervalos distintos. El *RSAM* es una variable que se actualiza cada  $n$  datos y su cálculo es inmediato de acuerdo con:

$$RSAM = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n x_{i-j}$$

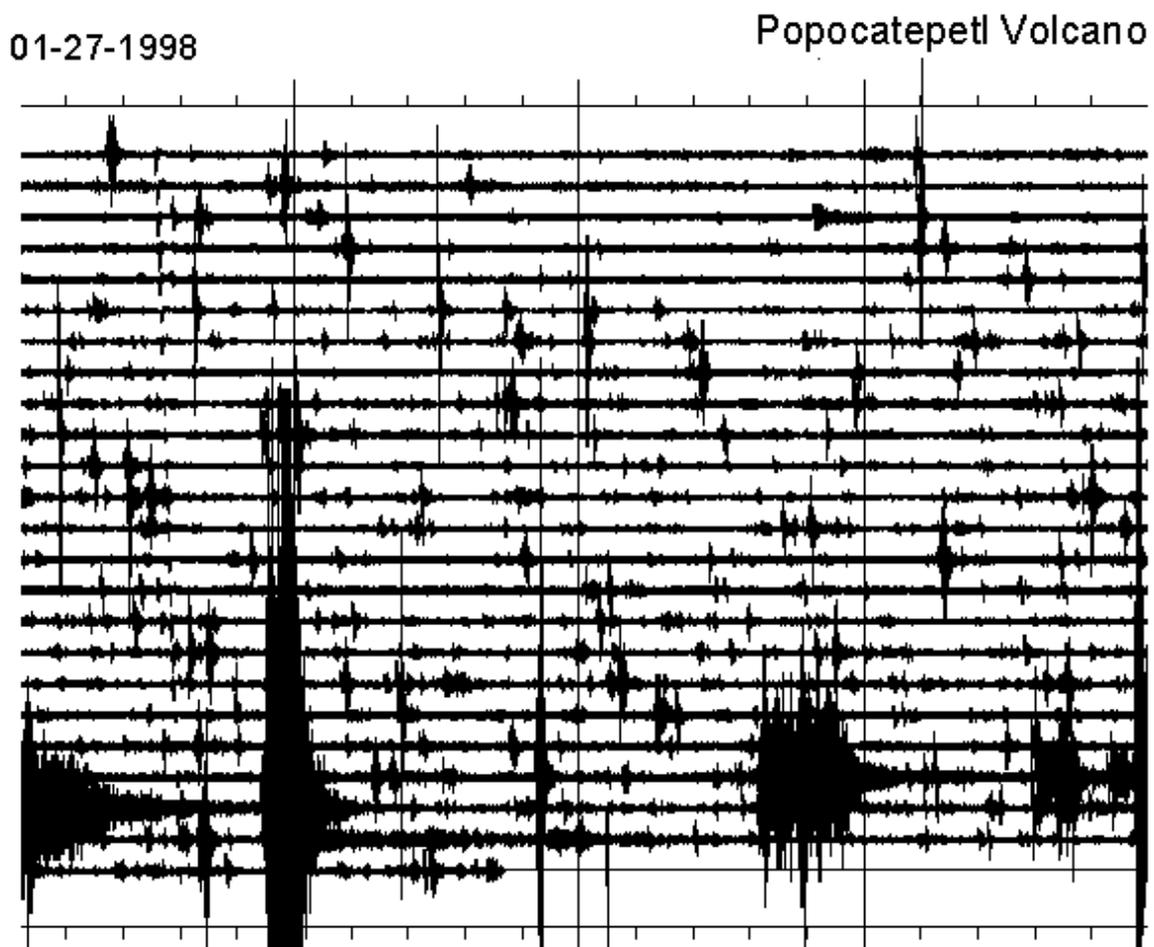
siendo  $x$  el dato de entrada y  $n$  el número de datos a promediar. En algunos casos se desea obtener el *RSAM* correspondiente a distintas bandas de frecuencias. Para ello es suficiente con implementar una batería de filtros FIR y calcular el *RSAM* para cada una de las bandas. Cuando se utiliza el *RSAM* para pronosticar el inicio de un evento explosivo es conveniente representar  $1/RSAM$ , pues se admite que el punto de corte de la pendiente de los tramos descendentes de  $1/RSAM$  con el eje de tiempos corresponde al momento esperado de la erupción. Por ello es conveniente generar el fichero de *RSAM* con los valores del tiempo (día juliano y fracción), *RSAM* y  $1/RSAM$  utilizando un formato ASCII que permite su representación inmediata con cualquier programa gráfico.



**Figura 11-13.** *RSAM* y  $1/RSAM$  correspondiente a una estación sísmica situada en el Volcán Villarrica (Chile). Los datos corresponden al incremento de actividad ocurrida en los meses de octubre y noviembre de 2000. La flecha muestra el pronóstico de una explosión realizado mediante la extrapolación (P) de la rama descendente del  $1/RSAM$ . Cortesía OVDAS (Chile).

## Resumen de la actividad

El análisis visual de la actividad sísmica es imprescindible en la atención de una crisis volcánica. Tradicionalmente este análisis era inmediato con los registros analógicos sobre papel, siendo muy difícil de realizar examinando los registros digitales independientemente. La solución consiste en obtener un registro similar al que ofrecen los sistemas analógicos. Para ello es suficiente con representar el máximo y mínimo de la señal sísmica cada segundo en líneas paralelas equivalentes cada una de ellas a 15 minutos de registro, pudiéndose obtener un documento similar al registro analógico tradicional. Teniendo presente que se trata de sólo una representación visual de la actividad es posible comprimir los datos reduciéndolos de 16 a 8 bits, obteniéndose finalmente ficheros de menos de 100 KBytes para un día completo de registro. Para la representación en pantalla se suele presentar el resumen de la actividad en las últimas cuatro horas, intervalo suficiente para un centro de atención permanente. Cuando se trabaja en monitoreo sísmico de tipo regional es posible utilizar una resolución menor y representar solamente las últimas 24 horas.



**Figura 11-14.** Resumen de 24 horas de actividad en el volcán Popocatepetl (México). Se aprecian múltiples eventos antes de la ocurrencia de una serie de explosiones en el domo. Cortesía CENAPRED (México)

El resumen de la actividad es en cierta forma similar al RSAM y aunque ambas funciones muestran la evolución de la sismicidad en el volcán, son conceptualmente

distintas: el RSAM representa los valores medios y el resumen los valores máximos y mínimos. El RSAM es más sensible a la evolución del tremor volcánico, mientras que el resumen lo es para eventos de tipo tectónico.

Para mantener un elevado margen de variación de la señal es conveniente utilizar una escala pseudo-logarítmica, por ejemplo se pueden asignar los 8 bits del siguiente modo:

Compresión 16 a 8 bits							
B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
signo				Exponente			

Esta codificación se implementa mediante un algoritmo muy sencillo.

```

paso = abs(resumen[i]);
if(resumen[i]<0)signo=true;
else signo=false;
bits = 0;
do
{
    paso_c = paso_b;
    paso_b = paso_a;
    paso_a = paso;
    paso >>=1;
    bits++;
}
while(paso);
if(bits>3)bits-=3;
else bits=0;
if(signo)bits|=0x80;
if(paso_a&0x01)bits|=0x40;
if(paso_b&0x01)bits|=0x20;
if(paso_c&0x01)bits|=0x10;
dato[i]=bits;

```

El vector resumen[i] contiene los valores máximo y mínimo de la señal de cada periodo (6 segundo para resumen de 24 horas y 1 segundo para 4 horas). En el vector dato[i] es la salida en caracteres de 8 bits.

### Ajuste de cero

En ocasiones la señal presenta un error de cero importante, como es el caso de los sismómetros de banda ancha, de los sensores con respuesta ampliada, o al propio conversor analógico digital. Para estos casos es conveniente implementar una función de corrección automática de cero que es muy sencilla si se utiliza un filtro pasa bajos:

```

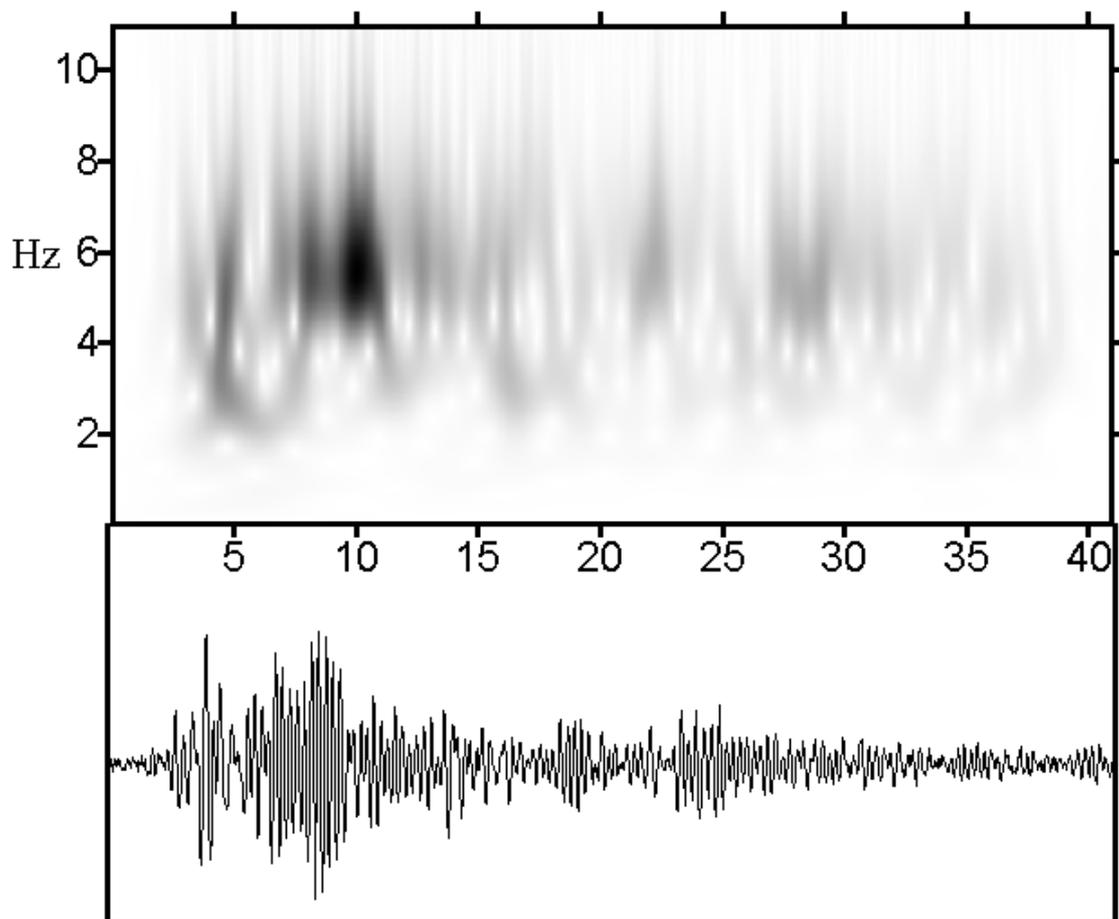
if(offset_control)
{
    static int cero, zero;
    zero = cero>>k_cero;
    cero+=((long)adc - zero);
    adc-=(short)zero;
}

```

$k_{\text{cero}}$  es la constante del filtro, que depende de la frecuencia mínima que se desea registrar. Un valor de compromiso para sensores de periodo propio inferior a 100 segundos es 12.

### Otras funciones

Otras funciones en tiempo real que pueden ser útiles disponer en algunos casos son la polarización media de la onda sísmica, el espectro, paquetes de filtros o un análisis que permita realizar una clasificación automática de los eventos como la descomposición en *wavelet*.



**Figura 11-15.** Análisis wavelet de un evento registrado en el volcán Arenal.

### Implementación

Aunque es posible desarrollar un programa que realice todas estas funciones, es preferible preparar un programa independiente para cada una de estas funciones. De esta forma se simplifica el mantenimiento del software y el fallo de una aplicación no bloquea a todo el sistema. Lo mejor es realizar un módulo principal, encargado de la entrada de datos y su almacenamiento directo en el disco. Este módulo mediante mensajes UDP envía los datos a cada una de las otras aplicaciones, que pueden estar implementadas en la misma o en distintas máquinas. El protocolo UDP presenta la

ventaja de que si la aplicación de destino no se encuentra disponible, no se produce un error en la aplicación origen, como ocurre con otros protocolos. Los mensajes para la transferencia de datos pueden adoptar cualquier formato, aunque existen algunos formatos ya establecidos y que presentan la ventaja de que se encuentra disponible abundante software para ellos. Como ejemplo podemos citar el EARTHWORM que responde a la siguiente estructura

```
typedef struct
{
  unsigned char  msgInst;      // Message Installation (0=>Earthworm)
  unsigned char  msgType;     // Message Type
  unsigned char  modId;      // Id of module originating message
  unsigned char  fragNum;    // Packet number of message; 0=>first
  unsigned char  msgSeqNum;  // Message Sequence number
  unsigned char  lastOfMsg;  // 1=> last packet of message, else 0
  int  pinno;                // Pin number must be greater than 0;
                               // if =0 designates 'no pin number used'
  int  nsamp;                // Number of data samples in message
  double starttime;         // Seconds since midnight 1/1/70
  double endtime;          // Seconds since midnight 1/1/70
  double samprate;         // Nominal sampling rate
  char  sta[7];             // Site code
  char  net[9];             // Network code
  char  chan[9];           // Component/channel code
  char  datatype[3];       // Data format code as per IRIS/CSS. char  quality[2]
                               //Data quality flags:
                               // byte 0 as in SEED definition,
                               // byte 1 as in earthworm A/D module
  char  quality[2];        // Data quality flags
  char  pad[2];            // padding;
  short int ext[UDP_DAT]; // The cargo bay, as characters
} PACKET;
```

Este paquete se ha diseñado para trabajar en sistemas de registro sísmico convencionales para el estudio de la sismicidad de tipo tectónico, aunque ya existen para él ampliaciones para el análisis de la sismicidad volcánica. Originariamente se concibió para correr sobre máquinas UNIX, aunque existen ya versiones disponibles para Windows NT. En general, es un sistema que requiere máquinas muy potentes. La utilización del paquete EARTHWORM es muy sencilla cuando se utiliza un lenguaje de programación como C en el que es suficiente con definir la estructura anterior y una unión para remitir o recibir los mensajes UDP. Por ello es preferible implementarla, aunque en nuestras aplicaciones la mayor parte de los campos queden vacíos. Sin embargo, si en algún momento queremos utilizar alguna de las aplicaciones nativas para este paquete, no necesitaremos rehacer todo el programa. Para facilitar la transmisión de la estructura EARTHWORM en un mensaje UDP es conveniente definir la unión:

```
union paso
{
  char character[1472];
  PACKET paquete;
}paso;
```

La utilización de la estructura es muy simple, basta con definir las constantes al inicio del programa y actualizar cada vez los datos

```
PACKET_GUSANO_0.ext[i_UDP] = adc[j];
```

en el momento de la transmisión se debe actualizar el tiempo, el número de orden del paquete y llamar a la función UDP:

```
contador_mensajes ++;
PACKET_GUSANO_0.starttime = segundos;
PACKET_GUSANO_0.endtime = segundos + duración_mensaje;
PACKET_GUSANO_0.msgSeqNum = contador_mensajes;
paso.paquete = PACKET_GUSANO_0;
NMUDP1->RemoteHost = IP_gusano;
NMUDP1->RemotePort = port_gusano;
NMUDP1->SendBuffer(paso.caracter, n, n);
```

donde n es la longitud en Bytes del paquete (70 + 2 x Número de datos). La recepción del paquete es también muy sencilla y utiliza las mismas estructuras:

```
void __fastcall TForm1::NMUDP1DataReceived(TComponent *Sender,
    int NumberBytes, AnsiString FromIP)
{
    int j;
    union paso
    {
        char caracter[1472];
        PACKET paquete;
    }paso;
    NMUDP1->ReadBuffer(paso.caracter,1472,j);
    PACKET_SISMO = paso.paquete;
    .....
}
```

La dirección IP permite transferir la información a aplicaciones que corran sobre la misma máquina (IP 127.0.0.1) o en máquinas distintas.

En sistemas operativos como el Windows en sus distintas versiones, una aplicación puede estar varios segundos sin ser atendida. Esto hay que tenerlo muy presente y sobredimensionar los buffer de entrada y salida para evitar desbordamientos. Además, los problemas derivados de este comportamiento del sistema operativo son muy difíciles de identificar, pues la aplicación puede estar funcionando correctamente durante muchas horas (días) y de repente empezar a fallar porque el sistema operativo ha decidido asignar mas prioridad a otra aplicación.

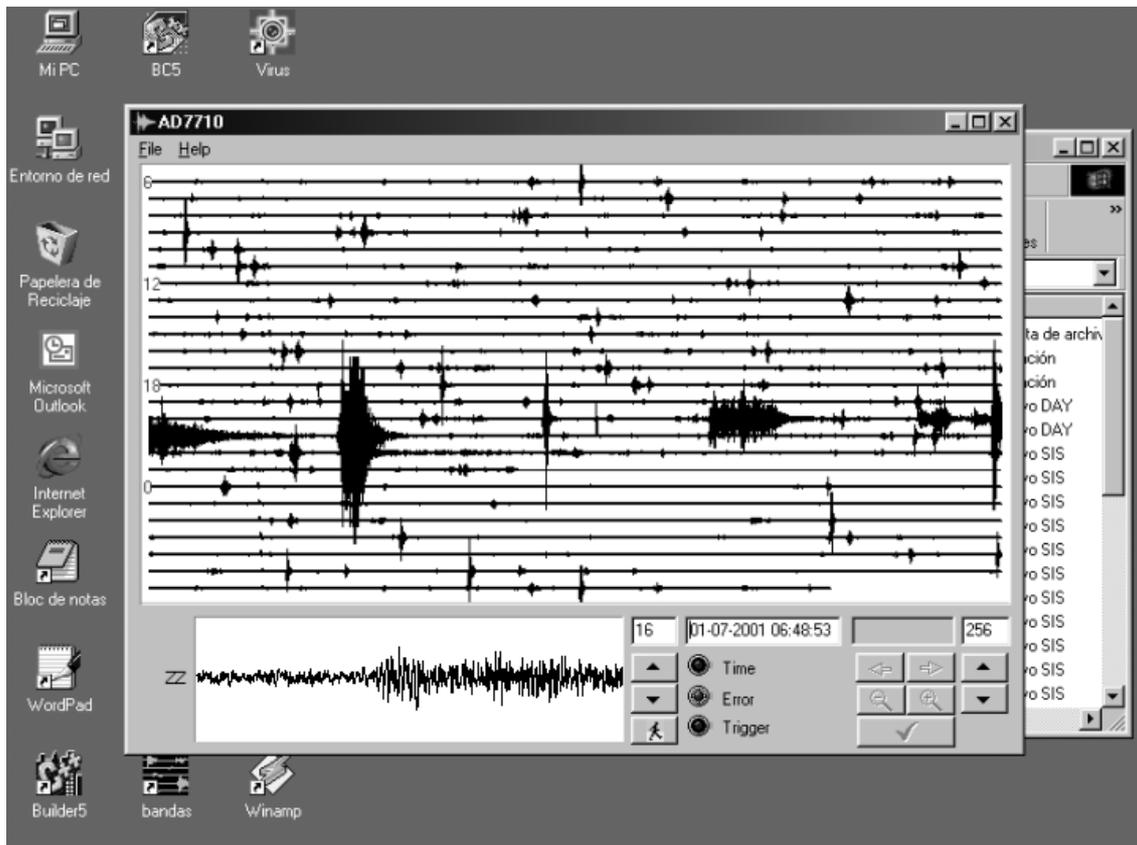
## **Interfase de usuario**

Actualmente no se concibe una aplicación informática que no cuide la interfase de usuario. En este caso es conveniente recordar que es sistema de registro sísmico constituye ante todo un elemento básico del sistema de vigilancia volcánica. Por ello es importante que la interfase del sistema de registro muestre de forma clara e intuitiva la evolución de la actividad sísmica. En este sentido, no hay nada mejor que realizar una versión de los clásicos registradores de tambor en soporte informático. Es decir, una hoja donde se muestre gráficamente la actividad sísmica de 24 horas.

Sin embargo, la resolución de una pantalla gráfica convencional no permite presentar, con suficiente nitidez, 24 horas, pero sí 4 horas. Por esta razón, se han previsto dos opciones: 24 horas, con baja resolución y 4 horas a alta resolución. Además, es posible hacer un zoom sobre cualquier parte de la imagen y apreciar así cualquier detalle. Los centros que dispongan de turnos de guardias que cubran 24 horas pueden trabajar perfectamente con las imágenes de 4 horas, sin embargo, los centros que realizan

habitualmente jornada laboral de 8 horas es preferible que utilicen rutinariamente el formato de 24 horas.

Desde la interfase de usuario se pueden modificar todos los parámetros que permiten examinar la señal, pero no se tiene acceso a las constantes que controlan la operación del equipo, que son accesibles mediante un programa de setup. De esta forma se evita que un error involuntario deje fuera de servicio el sistema o no sea posible conocer las condiciones de operación del equipo en una determinada época.

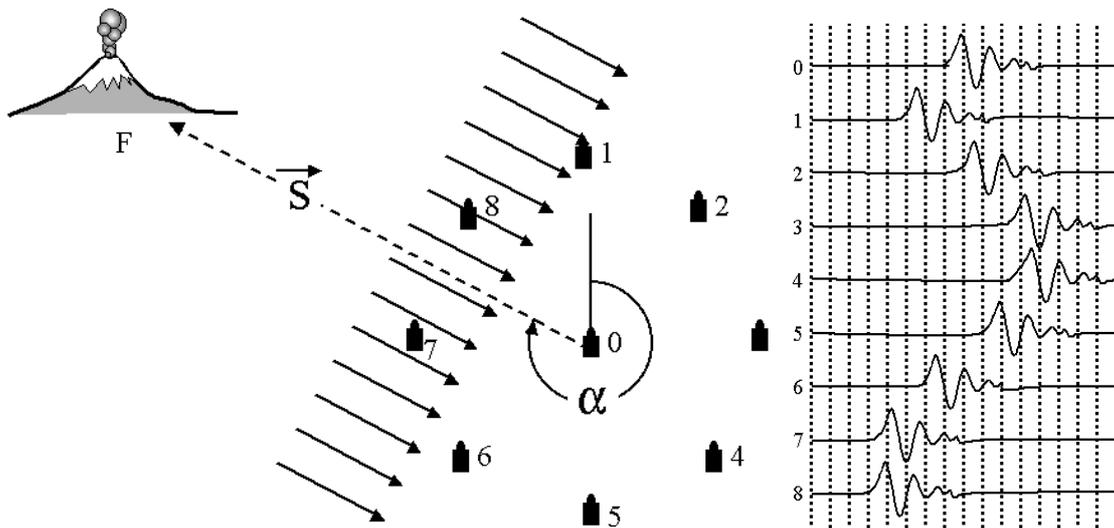


**Figura 11-16.** Interfase de usuario del sistema de registro sísmico desarrollado por el Departamento de Volcanología del CSI. La pantalla está dividida en dos regiones, en la inferior se muestra la señal que está entrando en es momento y permite detectar cualquier problema inmediatamente. La parte superior corresponde al resumen de la actividad de las últimas 24 o 4 horas, según opción. Es posible ampliar cualquier parte de la imagen, así como temporizar fases. Una serie de indicadores luminosos alertan sobre cualquier tipo de incidencia, como puede ser un fallo en el sistema de ficheros, mala recepción de la señal GPS, etc.

# TÉCNICAS DE ANTENA SÍSMICA EN VOLCANOLOGÍA.

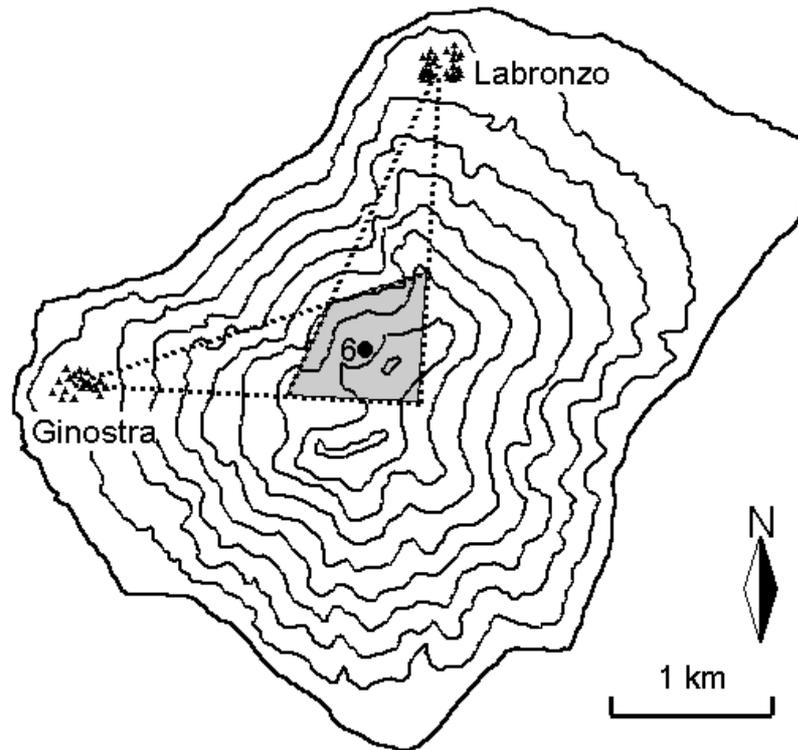
## Introducción.

Una antena sísmica o *array* es un conjunto numeroso de sismómetros distribuidos en una superficie reducida. Los instrumentos utilizados deben tener características similares y la zona de despliegue debe ser lo más homogénea posible. La aplicación de las antenas se está utilizando ampliamente en el estudio de la sismicidad volcánica. La razón hay que buscarla en la facilidad de su despliegue y operación en comparación con las redes sísmicas tradicionales y especialmente en la posibilidad de caracterizar el temblor volcánico (*tremor*). Existen muchas modalidades de antenas, desde las que utilizan numerosos sensores de banda ancha, hasta las más sencillas que sólo emplean tres sensores de electromagnéticos de alta frecuencia.



**Figura 12-1** El principio de funcionamiento de una antena sísmica es caracterizar una señal sísmica partiendo del análisis simultáneo de los registros obtenidos por un número elevado de sensores. El dispositivo permite caracterizar la señal en función de un ángulo de incidencia  $\alpha$  (azimut) y un vector  $S$  (lentitud) definido como inverso de la velocidad aparente del frente de ondas. La figura muestra una antena circular de 9 canales sobre el que incide una onda plana y el registro obtenido en cada canal.

Las técnicas de localización de las antenas sísmicas suministran, como primer dato, el valor de la velocidad aparente con que las ondas atraviesan la superficie de las antenas, y el azimut epicentro-antena de la fuente sísmica. Si se combina este dato con el de datos de lectura P y S y trazado del rayo, entonces es posible determinar la posición del foco de estos terremotos. Para las otras señales, en las que se carece de fases reconocibles, una antena sólo da información de la dirección de la fuente y de la propagación de las ondas. Si se usan dos antenas combinadas, es posible determinar la posición de la zona epicentral. Esta determinación es imposible usando una red sísmica convencional.

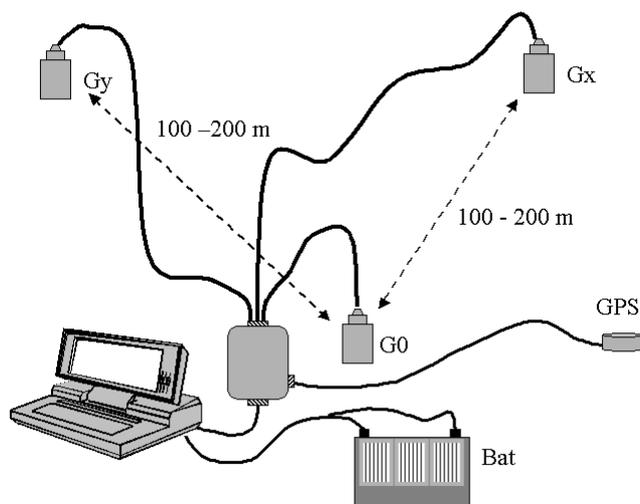


**Figura 12-2.** Determinación de la zona fuente mediante dos antenas sísmicas. La figura corresponde a un experimento llevado a cabo en el volcán Stromboli por el Observatorio Vesubiano, el Instituto Andaluz de Geofísica y el Departamento de Volcanología del CSIC.

### Técnicas de antenas sísmicas

Tradicionalmente el registro sísmico se ha realizado mediante redes sísmicas, formadas por numerosas estaciones con enlaces telemétricos, distribuidas de forma que cubran todo el entorno de la zona donde se producen los eventos. Este tipo de redes se utiliza normalmente para el seguimiento de las crisis volcánicas, sin embargo, el despliegue de una red sísmica de este tipo alrededor del volcán en muchas ocasiones no es posible, especialmente por causa de la topografía, ausencia de vías de comunicación o falta de tiempo. La puesta en operación de los enlaces telemétricos tampoco resulta fácil de conseguir en poco tiempo. Durante la crisis de un volcán es necesario tener acceso en tiempo real a los datos registrados por cada una de las estaciones que configuran la red. En general, hay que acudir a varios repetidores para hacer llegar la señal de las distintas estaciones al centro de registro. La contaminación del espectro radioeléctrico hace que los registros obtenidos en estas circunstancias sean habitualmente de moderada calidad. La pérdida de uno de los repetidores puede suponer que un grupo importante de estaciones quede inoperativo. El fundamento del método de análisis de los registros obtenidos en una red sísmica para el estudio de la sismicidad de una zona se basa en identificar las distintas fases de los eventos y determinar las diferencias de tiempo. Partiendo de estas diferencias, se procede a la localización del foco. La máxima precisión en la localización, con los algoritmos tradicionalmente usados basados en técnicas de mínimos cuadrados, sólo se obtiene si el evento se produce dentro de la red. La pérdida de un grupo de estaciones hace perder mucha precisión a la red.

**Figura 12-3.** Una antena sísmica está constituido por una serie de geófonos (G) unidos por cables a un sistema de conversión analógica digital, un computador para almacenaje de los datos y un sistema de alimentación (Bat). Es conveniente disponer también de un receptor GPS.



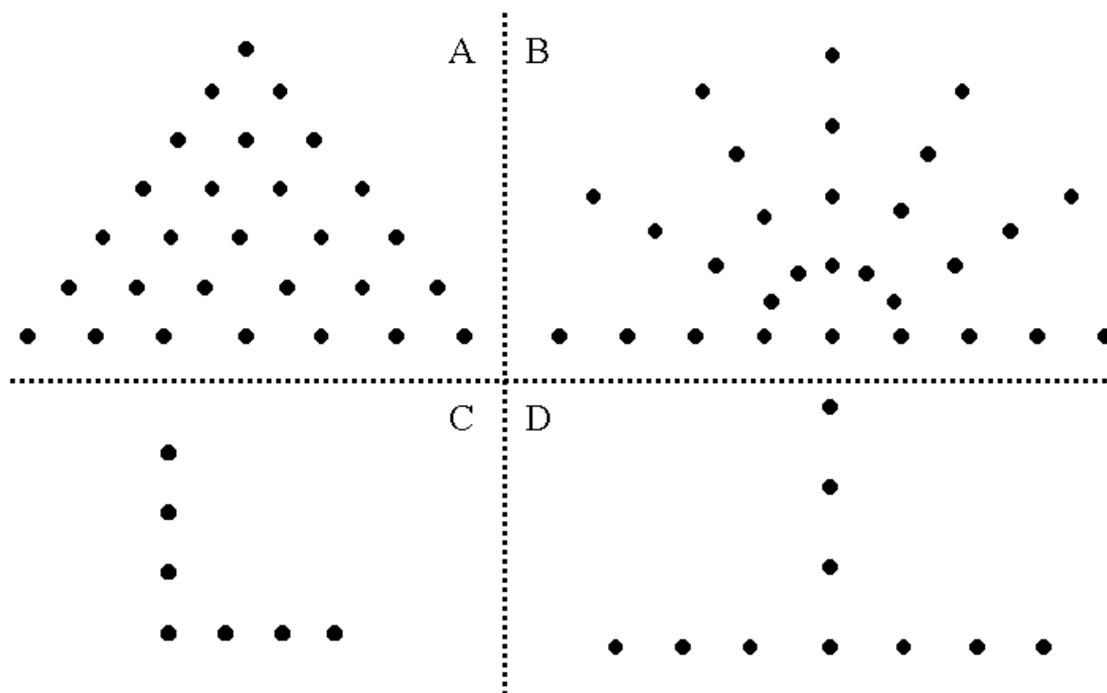
La solución es utilizar una metodología alternativa a las redes sísmicas como los dispositivos de antena, es decir un conjunto de sensores sísmicos distribuidos con una adecuada geometría en una limitada extensión de terreno. Ahora, el estudio de los registros no se realiza individualmente, estación por estación, sino simultáneamente y utilizando técnicas de análisis de señales. En un dispositivo de antena, al tener muy próximos todos los sensores, se pueden utilizar enlaces de mucha mayor velocidad que en las permitidas con telemetría radio, lo que permite aumentar la frecuencia de muestreo y la resolución de los conversores analógico digital. Además, las pérdidas de datos por interferencias son casi nulas y también se posibilita un mejor mantenimiento del equipo. Finalmente, al estar concentrados todos los equipos en una zona limitada es mucho más fácil de vigilar y por ello más segura frente al vandalismo.

### Desarrollo de un sistema de antena sísmica

Un antena sísmica está compuesta por una serie de sensores de los que debe conocerse perfectamente su respuesta individual. Unos enlaces, generalmente por cable, uno o varios sistemas de conversión analógica digital y un ordenador de adquisición de datos. Como elemento auxiliar se incluye un sistema de tiempo absoluto y el sistema de alimentación. Para simplificar la operación, cuando el número de sensores aumenta, es preferible adoptar una configuración con varias unidades de adquisición de datos sincronizadas. De esta forma, se evita tener que establecer largos enlaces múltiples entre los sensores y el sistema de registro. En estos casos, si se desea el proceso en tiempo real, hay que incluir otra unidad, con mayor capacidad de cálculo que centralice los datos de todas las sub-unidades. Estos enlaces deben ser de alta velocidad, pero actualmente no suponen un excesivo costo adicional, pues son unidades estándar de la industria informática. Al ser toda la telemetría por cable se simplifica el problema de la alimentación de todo el sistema.

La técnica de antena sísmica se basa en el análisis digital simultáneo de las señales registradas por todos los sensores. Además se debe conocer perfectamente la respuesta de cada uno de los sensores y, especialmente y con alta precisión, la geometría de la antena. Cuando un frente de ondas alcanza una antena, los distintos sensores van

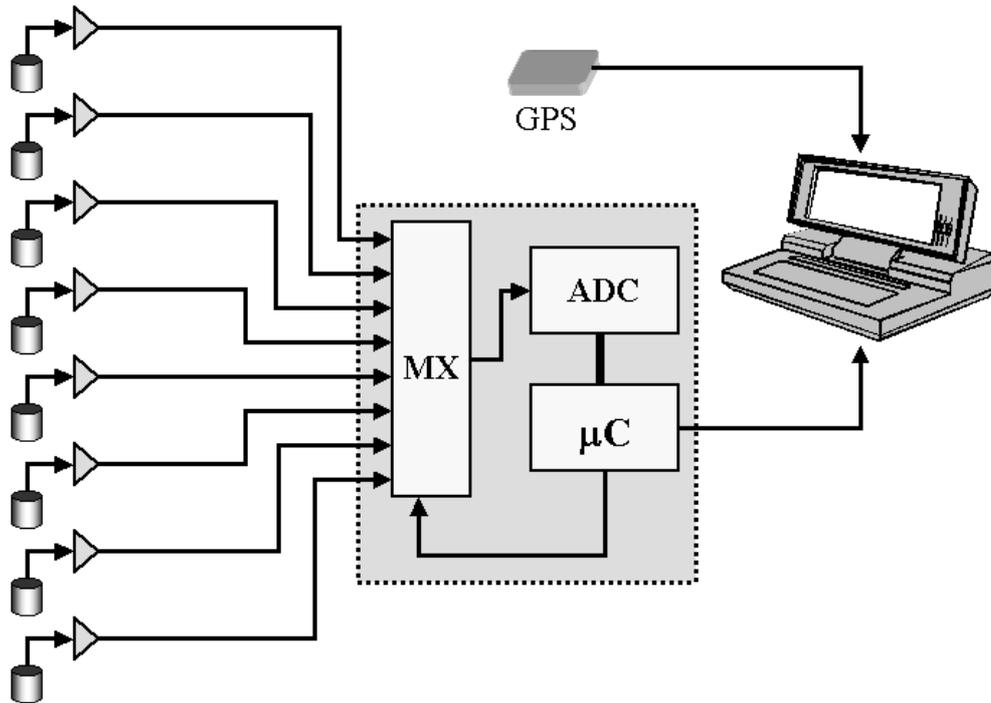
recibiendo la señal con pequeñas diferencias de tiempo, función de las distintas distancias que los separan del foco. Las pequeñas diferencias de fase que aparecen en los registros permiten determinar la dirección y distancia de fuente. La velocidad aparente con que se propaga el paquete de ondas determina la profundidad del foco. Esta técnica también se podría aplicar con redes convencionales, sin embargo, en el caso de la antena, el ruido presente en todos los sensores es coherente y por consiguiente cancelable, cosa que no ocurre en el caso de una red. Por otro lado, las diferencias de estructura entre las estaciones de la red son difícilmente evaluables, mientras que la antena se dispone siempre de forma que sus sensores estén desplegados sobre la misma estructura. Además, para poder analizar la propagación de todo el paquete de ondas a través de la antena, es necesario que las longitudes de onda que intervienen sean mayores que las dimensiones de la antena, puesto que de otro modo se presentan fenómenos de aliasing espacial, análogos a los que aparecen en el dominio temporal, cuando la señal muestreada posee componentes de frecuencias más altas que la frecuencia de muestreo.



**Figura 12-4.** Los sensores de la antena pueden disponerse de distintas formas, en triángulo (A), en círculo (B), etc. Sin embargo, cuando se dispone de pocos sensores es preferible adoptar geometrías más sencillas en L (C) o en T (D) que permiten cubrir mayores distancias entre sensores.

Los retardos esperados son función de la distancia entre sensores, así, para una distancia media de 100m entre sensores, y una velocidad aparente de 2 km/s, el retardo máximo que se puede esperar es de sólo 50 ms. Si se quiere una precisión del 1% significa que se debe mantener los errores por debajo de 0.5 ms. La necesidad de poder alcanzar esta resolución condiciona el diseño de todo el sistema, especialmente la generación de marcas de tiempo sincrónicas en todos los equipos y poder trabajar a frecuencias de muestreo muy elevadas. El conocimiento de la geometría de la red deberá conocerse con la misma precisión, así como la respuesta en tiempo de los sensores y electrónica asociada. Determinar cual es la geometría óptima del dispositivo de antena en una determinada aplicación es la primera cuestión a resolver. La geometría a utilizar vendrá en primer lugar condicionada por el espacio disponible donde se pueda desplegar la antena, hay que pensar que se requiere una zona extensa y lo más regular posible,

además de contar con facilidades de acceso y seguridad. Después, intervienen las características de las señales a registrar, su contenido espectral y su origen.



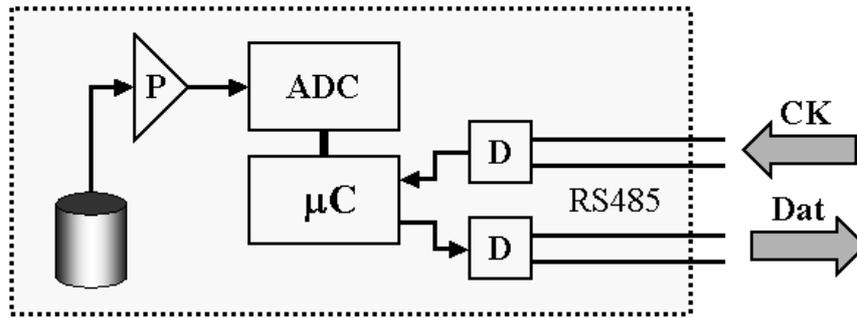
**Figura 12-5.** Módulo de antena de 8 canales que utiliza un único convertor analógico digital de 16 bits de alta velocidad para medir consecutivamente todos los canales de entrada. Un microcontrolador gestiona la adquisición y las transferencias con el computador.

En ocasiones, el ruido presente en la zona será otro punto a considerar. Los dispositivos en T o en L permiten cubrir mayor número de longitudes de onda. Inicialmente se utilizaron dispositivos con geometrías regulares, con un muy elevado número de geófonos. Al disminuir el número de geófonos, manteniendo la misma resolución en cuanto a longitudes a onda, es necesario acudir a distribuir los sensores en forma no regular, ya que de otro modo el *aliasing espacial* nos obligará a limitar el espectro. En general se combinan grupos de antena para cubrir un mayor número de ondas. En estos casos es imprescindible la sincronización de todas las unidades de registro con precisiones mejores a una muestra, pues de otro modo no es posible correlacionar unas señales con otras. Es importante tener en cuenta que la simple transmisión de un pulso por un cable ya introduce un retardo que según sean las condiciones del cable puede llegar a ser importante. La utilización de sistemas GPS, siempre que todas las antenas tengan visibilidad a la misma constelación de satélites, puede ser una posible solución.

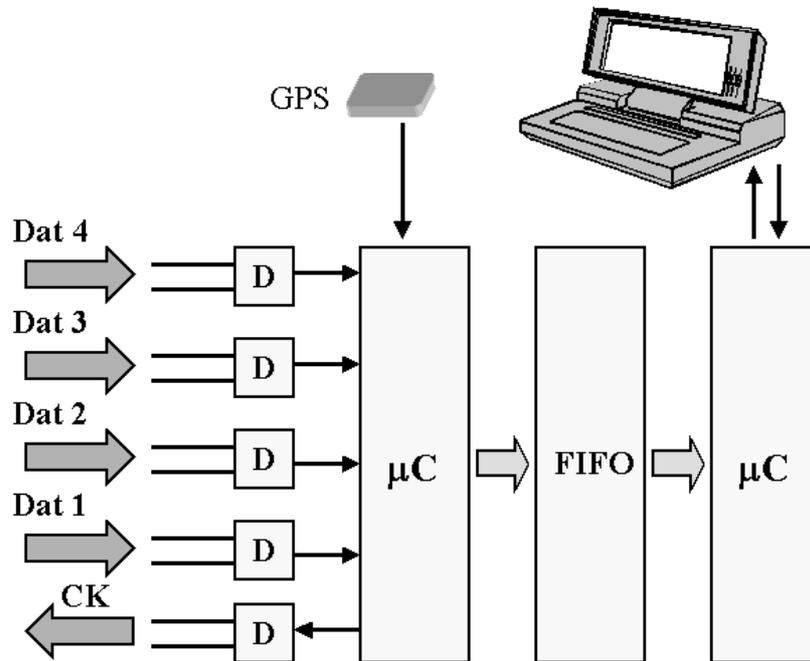
### Módulo electrónico

Una antena sísmica puede concebirse de múltiples formas, la más sencilla consiste en disponer de muchas estaciones autónomas que se despliegan en un reducido espacio y todas ellas con un sistema de sincronismo temporal. Con esta configuración no es posible tener información en tiempo real, además de requerir una elevada inversión en sistemas de registro y de sincronismo temporal. La solución extrema sería utilizar una única unidad de registro y multitud de sensores conectados a ella, con un sistema de

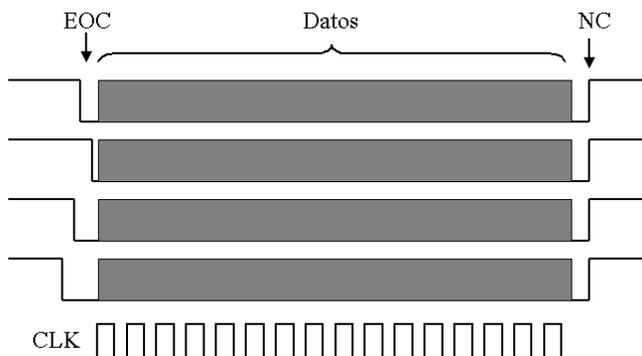
tiempo local. Esta configuración permite tener información en tiempo real, pero exige gran capacidad de almacenamiento y una velocidad de cálculo muy elevada.



**Figura 12-6.** Actualmente se utiliza un convertor delta sigma independiente para cada canal que se monta en la misma caja que contiene el geófono y su circuito de ecualización. Se utiliza una interfase serie síncrona de forma que todas las unidades transmiten los datos controlados por el mismo reloj CK.



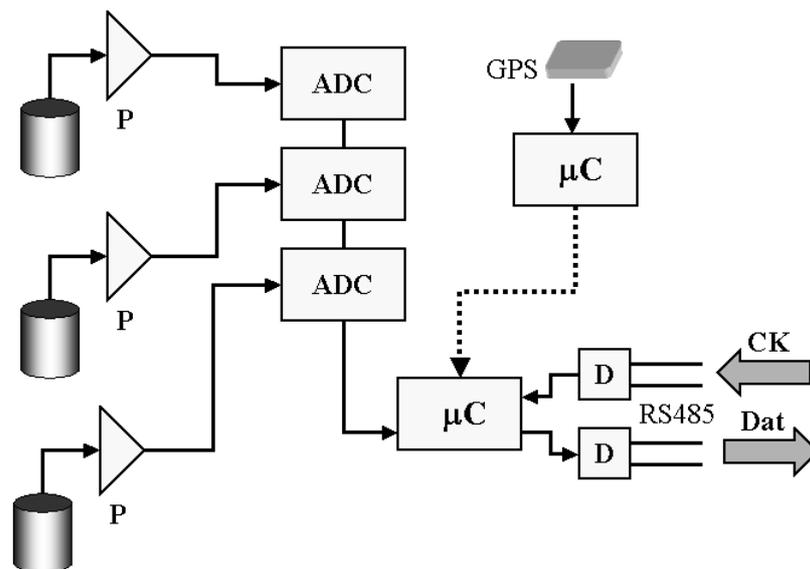
**Figura 12-7.** Un módulo recibe sincrónicamente los datos procedentes de los distintos sensores y los transfiere al computador de almacenamiento. Para facilitar esta operación, es conveniente intercalar una memoria FIFO y otro microcontrolador. De esta forma se pueden utilizar sistemas operativos como el Windows, que no están concebidos para este tipo de aplicaciones.



**Figura 12-8.** Cuando cada convertor dispone de un dato para su transmisión pone a cero la línea de salida, una vez todos los convertores han finalizado (EOC), el microcontrolador envía los 16 pulsos de reloj (CLK), se transfieren todos los datos y se inicia otro ciclo de medida (NC), subiendo las líneas de datos a 1.

Una solución intermedia, que además es muy flexible de operación, es disponer una serie de unidades de registro, cada una de ellas con capacidad máxima para 8/16 canales dotadas con su sistema de tiempo absoluto de precisión. De esta forma, los sistemas de adquisición no requieren elevadas prestaciones y se puede contar con una pequeña antena que opera en tiempo real mientras que todo el conjunto lo hace en modo diferido. Además, su despliegue en el campo es mucho más fácil, al poderse adaptar a las características del espacio disponible.

El computador, el módulo de adquisición de datos, el receptor GPS y la fuente conmutada deben protegerse de las inclemencias del tiempo mediante una caja a prueba de agua y térmicamente bien aislada. La entrada de los cables debe hacerse mediante pasamuros o sellarse con un adhesivo. Mucho cuidado con cierto tipo de siliconas, con elevado contenido en ácido acético que produce importantes corrosiones en los circuitos impresos. Si se utiliza un sellador, esperar que se seque completamente con la caja abierta bien ventilada. Se pueden conseguir pasamuros en plástico muy económicos que permiten eliminar los costosos conectores herméticos, conectando todos los cables mediante tornillos directamente a sus respectivos módulos.



**Figura 12-9.** Una solución intermedia, muy cómoda de operar, es construir módulos de tres canales, que pueden ser los mismos que se utilizan en estaciones de tres componentes, a los que sólo es necesario modificar la interfase de salida para que puedan operar en modo síncrono y a mayor velocidad de transferencia. En algunos casos requerirán también el receptor GPS.

La conexión de los distintos módulos debe hacerse con cuidado, utilizando cables gruesos para todas las alimentaciones y evitando que se produzcan lazos de masa. Toda la electrónica debe estar protegida contra inversiones de polaridad, sin embargo, la conexión de una línea positiva a masa provocará un cortocircuito a la batería, que destruirá seguramente parte del cableado. También todas las entradas deberán estar protegidas contra transitorios de alta tensión, para lo cual se pueden utilizar dispositivos TRANSZORB. La antena del GPS, deberá colocarse de forma que tenga visión sobre el máximo horizonte posible. Los sensores deberán enterrarse lo más posible, lo cual no siempre es tarea fácil. Deberá cuidarse especialmente que no le pueda entrar agua al

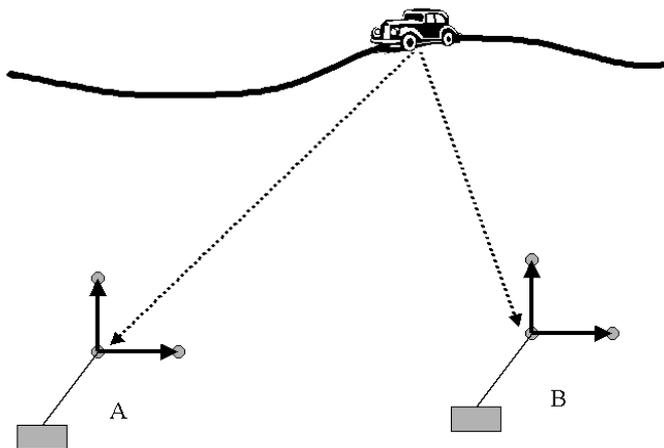
sensor o al conector. Una buena precaución, además de sellar perfectamente todas las juntas y de proteger todos los tornillos, es encerrarlos bien dentro de una bolsa de plástico, que se atará fuertemente alrededor del cable. Todo ello se sujeta con cinta adhesiva.

### Software para la operación de la antena

El programa de adquisición es una adaptación del habitualmente utilizado en estaciones y redes sísmicas digitales, basándose en un algoritmo del tipo STA/LTA, al que se le ha añadido una función del tipo despertador para poder registrar de acuerdo con una tabla de tiempos establecida. Se obtiene dos ficheros con extensiones DTS y SAD, el primero recoge toda la información de cabecera, mientras que el segundo es un fichero binario con los datos de todos los canales multiplexados en tiempo. El inicio del registro es siempre en segundo exacto. El tiempo indicado en la cabecera corresponde a la primera muestra. Para evitar confusiones entre distintos equipos el identificativo de los ficheros responde al siguiente formato:

JJHHMMX.\*\*\*

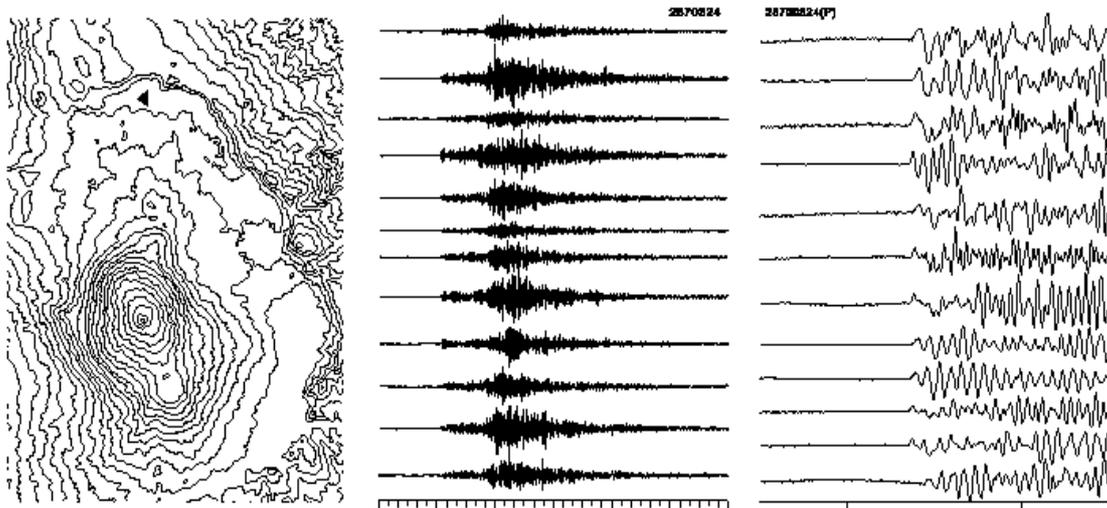
Donde JJJ es el día juliano del año en curso, HH la hora y MM el minuto correspondiente al inicio del registro. X es una letra que identifica el equipo que ha registrado el evento. \*\*\* es la extensión DTS para la cabecera y SAD para los datos en binario. La operación de un dispositivo de antena exige una perfecta sincronización de los relojes y utilizar un muestreo lo más elevado posible ya que de otro modo la correlación entre las distintas señales será muy difícil que pueda poner de manifiesto los pequeños retardos existentes entre las distintas llegadas. Por ello es necesario utilizar siempre un sistema de tiempo GPS, pues cualquier otro no puede garantizar sincronismos entre estaciones remotas inferiores a 0.1 ms. El programa de adquisición es del mismo tipo que el utilizado para la red sísmica, de la que se diferencia en que ahora debemos operar a una frecuencia de muestreo de por lo menos 200Hz. Además, debe existir la posibilidad de realizar registros simultáneos con distintas antenas, para ello se incorpora un fichero que contiene las horas de inicio de registro y las duraciones del mismo. Para mejor control de los registros se incorpora al fichero de cabecera de cada registro la información referente al estado del sistema GPS.



**Figura 12-10:** La técnica de localización con dos antenas de tres canales consiste en obtener para cada antena el correspondiente azimut de la señal y proyectar ambos. Deberá tenerse presente que al moverse la fuente el azimut es cambiante en el tiempo y que los tiempos de llegada son distintos para cada dispositivo.

## Instalación y operación

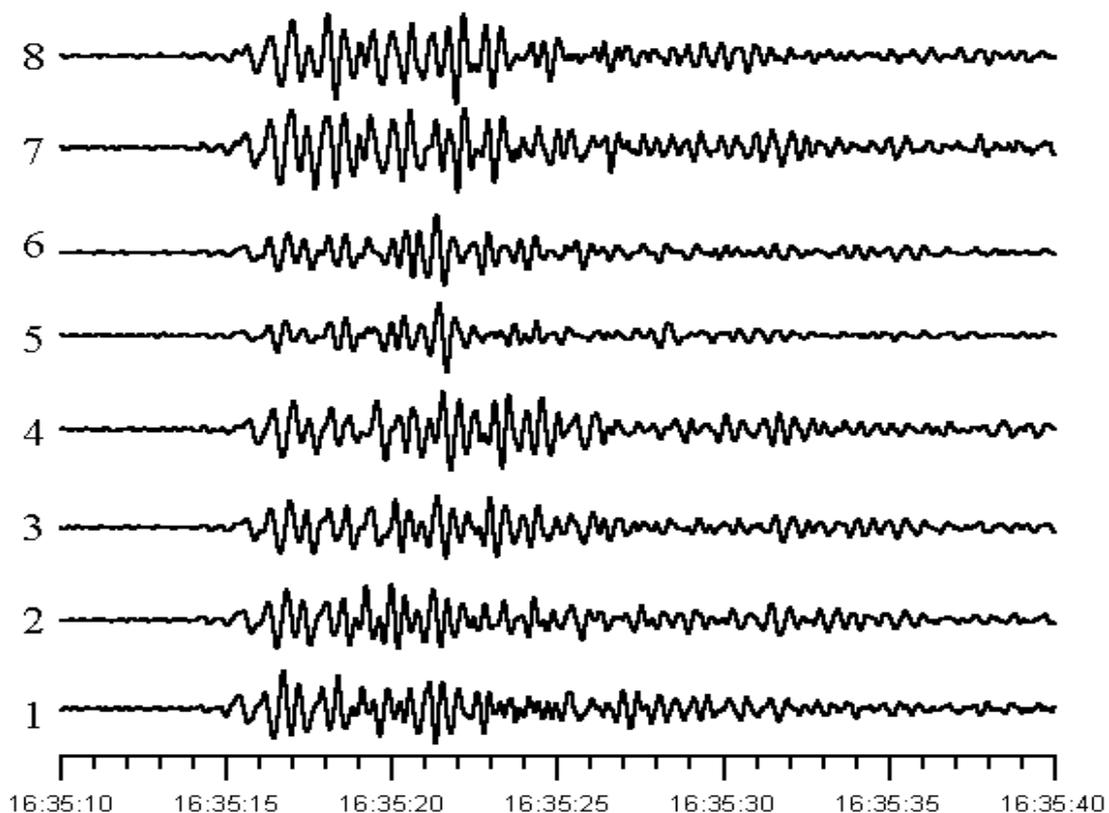
Se procederá a desplegar los dispositivos, con una separación entre geófonos comprendida entre 50 y 200 m. Cuando se dispone de pocos geófonos se elegirá un dispositivo en L que permite una mayor distancia entre sensores y simplifica la interpretación de los datos. El sistema de registro se situará a más de 100 m del geófono más próximo para evitar que el movimiento de los operadores perturbe demasiado la señal registrada. Una vez elegido el lugar de la instalación, se localizará mediante GPS el emplazamiento, y se procede a marcar el centro del dispositivo y los puntos donde se situarán los geófonos. Seguidamente se despliegan los cables, se sitúan y conectan los geófonos y se comprueba con el polímetro que la conexión y los cables estén correctos. Se debe prestar mucha atención al emplazamiento de los geófonos, midiendo cuidadosamente sus posiciones y respetando las polaridades. Se conecta el módulo central cuidando que el orden de los geófonos sea el correcto. Se conecta la antena del sistema GPS, el computador y los cables de alimentación. Se revisan todas las conexiones, se comprueban las polaridades y se alimenta el sistema. Para esta operación es conveniente utilizar una *lista de comprobación*. Deberá hacerse una reseña del emplazamiento y un croquis de la instalación. Para facilitar el conexionado de los geófonos y evitar tensiones en los cables, es preferible situar primero los geófonos y colocar en el centro de la hipotenusa el sistema de registro. Se comprueba que la señal sea correcta en los tres canales, ajustando la amplificación en caso necesario. Deberá existir coherencia entre las señales, estando todas ellas en fase. Esto es fácilmente observable en las componentes de baja frecuencia del ruido. Se llevará un cuaderno de incidencias, anotando los disparos que se produzcan, con un comentario sobre la posible fuente.



**Figura 12-11.** Se muestra el emplazamiento de una antena en el interior de la Caldera de Las Cañadas del Teide (Tenerife, Islas Canarias). El emplazamiento de la antena se eligió para poner de manifiesto la estructura de colapso de la caldera. Los registros sísmicos corresponden a un sismo de magnitud 2.4 ocurrido a 30 Km. de distancia entre las islas de Tenerife y Gran Canaria. Obsérvese la gran influencia que ejercen las diferencias de estructura existentes debajo de cada uno de los sensores. Las estaciones más próximas a la pared de la caldera registran con mayor amplitud y muestran una onda P nítida, mientras que las situadas más al interior de la caldera muestran menor amplitud y la onda P aparece contaminada por una onda estacionaria creada localmente.

## Análisis de los registros

Las técnicas de localización de las antenas sísmicas están basadas en la búsqueda de la máxima coherencia de la señal registrada en las estaciones sísmicas de la antena. Puesto que se usan paquetes de ondas más o menos largos, para estimar esta coherencia no es necesaria la identificación de las primeras llegadas impulsivas. Si entre las estaciones que forman la antena hay alguna de tres componentes y se conoce con algún detalle la estructura del terreno, se puede conocer además el ángulo de incidencia de la señal. Este ángulo también se puede determinar por simples razones trigonométricas si se conoce la velocidad aparente y la velocidad teórica de la onda. En el caso de poder identificar más de una fase y conocer su velocidad media de propagación es posible estimar la distancia hipocentro - antena e incluso inferir su profundidad focal.



**Figura 12-12.** Ejemplo de registro sísmico obtenido con una antena. Obsérvese la coherencia en fase entre los distintos canales. Se trata de una antena de ocho canales situado en la base del volcán Arenal (Costa Rica). Se adoptó un dispositivo en cruz, con los canales 1, 2, 3, 4 en dirección al cráter activo, siendo el canal 1 el más próximo. Los canales 5, 6, 7, 8 son transversales. La distancia entre geófonos es de 100 m, operándose a 200 muestras por segundo. Registro obtenido el 13-4-1997.

Se realiza primero una inspección visual en la pantalla del computador, seleccionándose aquellos que presenten una mejor coherencia entre señales y hayan sido obtenidos por los dos dispositivos. Seguidamente se procede a la descomposición de las señales seleccionadas en varias bandas mediante un filtrado digital. Para cada señal filtrada deberán seleccionarse varios fragmentos, cada uno de ellos con dos o tres oscilaciones de la onda predominante y que presenten buena coherencia entre los tres canales. Se debe calcular el retardo entre los distintos canales utilizando varias técnicas y con ello

determinar el azimut y la velocidad aparente. El proceso se repite para cada una de las bandas en las que la señal posea suficiente energía.

La búsqueda de la máxima coherencia se puede realizar a través de diversas técnicas, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. En el dominio del tiempo, una de las técnicas más comunes es la denominada de correlaciones cruzadas *Zero Lag Cross Correlation* ZLCC. Este método consiste en calcular la coherencia entre las distintas señales para todo azimut y velocidad posible. Para ello, se construyen primero una serie de tablas que dan el desplazamiento de cada traza en función de cada azimut y velocidad. Estas tablas sólo dependen de la geometría de la antena y por ello se calculan una sola vez. Una vez seleccionada la señal y una estación de referencia, se calcula la coherencia en función de sucesivos azimut y velocidades aparentes, desplazando los intervalos de señal en función de los tiempos de llegada teóricos. Aquella dirección y velocidad aparente que presente la mayor coherencia se puede considerar como la dirección de incidencia. Hay que asegurarse de que la coherencia obtenida sea suficientemente significativa. Si esta técnica se realiza a lo largo de la señal es posible no sólo estimar el origen de la fuente, sino su duración en función de la estabilidad del azimut foco-estación. Por otra parte, también se puede usar para identificar la posición de alguna heterogeneidad lateral suficientemente grande para producir ondas que sufren un proceso de *scattering* con suficiente energía. El mayor inconveniente que presenta esta técnica es la gran cantidad de tiempo de computación requerido y la sensibilidad de la coherencia en función de la longitud de la ventana. La función de correlación entre dos señales  $f$  y  $g$ , se define del siguiente modo

$$R(\tau) = \langle f(t) g^*(t + \tau) \rangle$$

donde  $\langle \cdot \rangle$  representa el promedio temporal. Si registramos una señal  $u(\mathbf{r}, t)$ , que se propaga con un cierto vector lentitud  $\mathbf{s}$ , en dos estaciones de la antena de modo que tengamos  $u_j(t) = u(\mathbf{r}_j, t)$  y  $u_k(t) = u(\mathbf{r}_k, t)$ , su correlación será máxima cuando el retraso  $\tau$  coincida con el tiempo efectivo que la onda invierte en llegar de la estación  $j$  a la  $k$ ,  $\tau_{jk}$ , que vale

$$\tau_{jk} = \vec{s} \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_k)$$

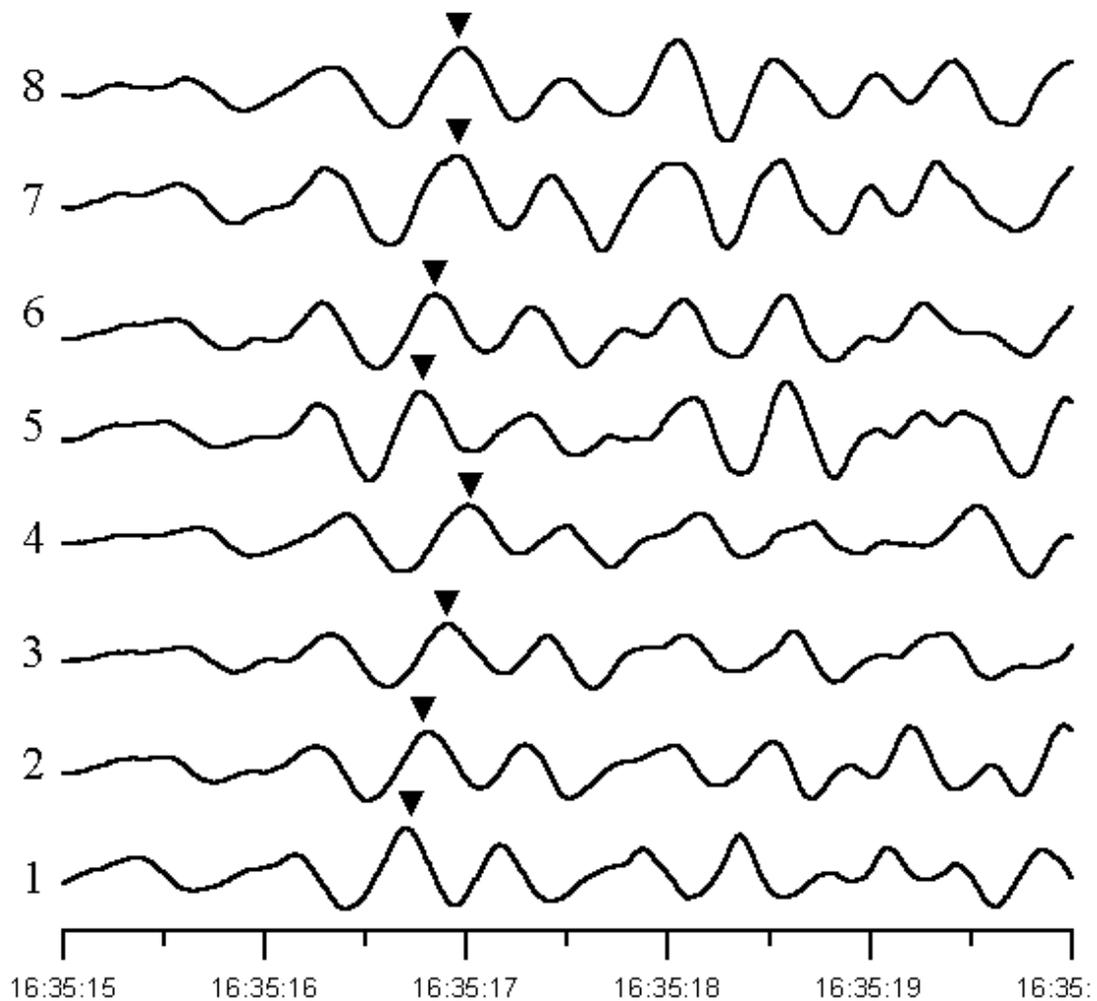
El método consiste en suponer que el vector lentitud toma valores dentro de una malla en la que  $s_x$  y  $s_y$  van desde  $-s_{\text{máx}}$  hasta  $s_{\text{máx}}$  con un cierto incremento  $s_{\text{inc}}$ . Calculamos las correlaciones de todas las trazas mediante la expresión

$$R_{jk}(\tau_{jk}(\vec{s})) = \langle u_j(t) u_k^*(t + \tau_{jk}(\vec{s})) \rangle$$

donde  $\tau_{jk}(\mathbf{s})$  es el retraso que la onda tendría entre las dos estaciones si se propagara con vector lentitud  $\mathbf{s}$ . Definimos el coeficiente de correlación medio normalizado como

$$\rho(\vec{s}) = \frac{1}{N} \sum_{j,k=1}^N \frac{R_{jk}(\tau_{jk}(\vec{s}))}{\sqrt{R_{jj}(0) R_{kk}(0)}}$$

El coeficiente de correlación no alcanza nunca la unidad, debido principalmente a la presencia de ruido sísmico y a la distorsión de la señal. La presencia de efectos de sitio muy locales puede provocar que la señal que registramos en diferentes estaciones de una antenna no sea exactamente la misma. Al máximo de este coeficiente de correlación dentro del plano de lentitud se le conoce con las siglas *MACC Maximum Average Cross Correlation*. En muy pocos casos se obtiene un azimut y un vector de lentitud bien definidos, en esos casos se representan los valores obtenidos para la coherencia en función de cada azimut y lentitud, con lo que se obtiene una superficie que muestra las posibles fuentes y su importancia relativa. Este método pone de manifiesto la existencia de problemas en la instalación de la antenna, que pueden ser debidos a la estructura del subsuelo o a fallos instrumentales.



**Figura 12-13.** Detalle del registro anterior donde se puede apreciar el retardo existente entre los distintos canales para una misma fase.

# **CENTRO DE ATENCIÓN PERMANENTE PARA LA GESTIÓN DE UNA CRISIS VOLCÁNICA**

## **Introducción**

En el momento en que se declara una crisis volcánica (que podrá ser real o no) inmediatamente debe iniciarse su seguimiento científico que exige:

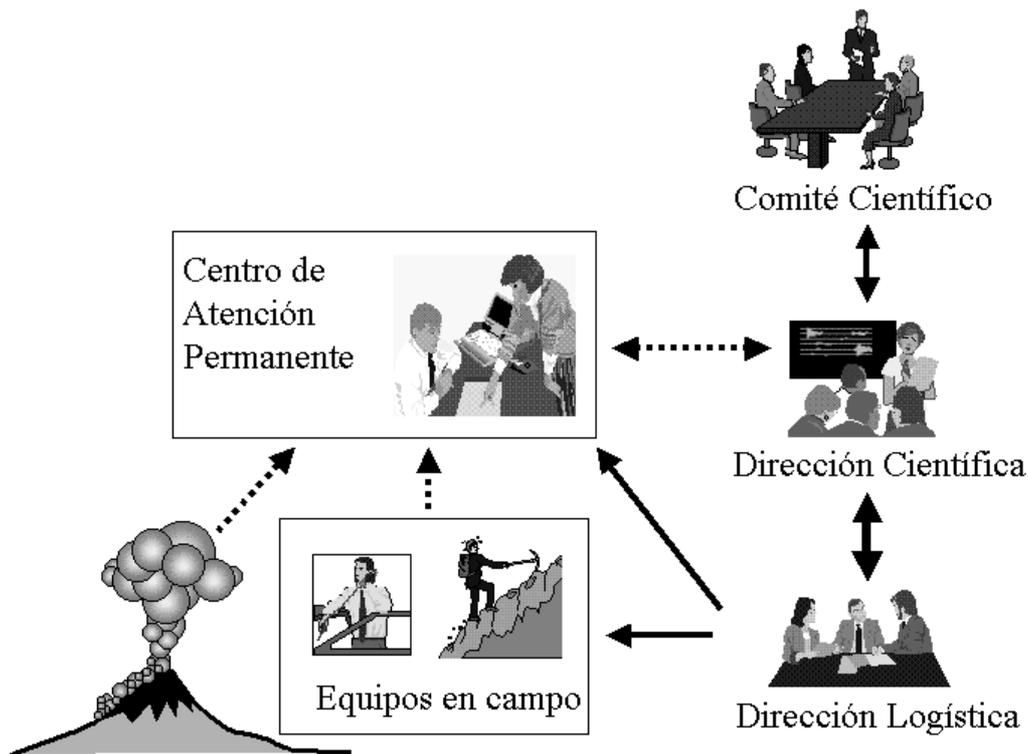
- Instrumentar el volcán o reforzar la instrumentación existente.
- Operar los equipos y analizar los datos obtenidos.
- Hacer pronósticos sobre la evolución de la crisis y sugerir acciones a tomar.

La organización del equipo que va a encargarse del seguimiento oficial de la crisis debe hacerse de forma que pueda operar de modo eficaz y continuo durante mucho tiempo. Además, el trabajar en un volcán en crisis es una actividad altamente peligrosa, debiéndose extremar las medidas de seguridad. Es importante integrar a todos los elementos de forma que se eviten situaciones de agotamiento y sin embargo se pueda dar respuesta a los problemas que surjan. Es necesario contar con instrumentación complementaria para atender la reactivación de un volcán. En general, se tratará de aumentar el número de estaciones sísmicas y clinométricas, instalar el sistema de detección de lahares, ampliar la capacidad de los enlaces telemétricos, disminuir el tiempo necesario para analizar los datos. En muchos casos, este es el momento de instalar las cámaras para la vigilancia visual del volcán. La utilización de dispositivos de array sísmico permiten realizar un buen seguimiento de la actividad sísmica del volcán sin necesidad de rodear el edificio con estaciones sísmicas convencionales con complejas redes telemétricas.

Los elementos clave son la constitución del comité científico y el equipo técnico encargado del seguimiento. Para ello es importante la existencia, además del Comité Científico, de dos centros de mando:

- Comité Científico para las relaciones con las autoridades, la protección civil y los medios de comunicación y coordinación entre instituciones.
- Dirección Científica que gestiona las actividades de cada colectivo de científicos. En muchos casos hay una dirección científica por cada institución. Muchos de sus miembros están integrados en el Comité Científico.
- Dirección Logística dirigida por un científico con experiencia en crisis volcánicas, es el centro con mayor complejidad y responsabilidad. Debe ordenar los recursos humanos y materiales de acuerdo con las directrices de la Dirección Logística.

De la dirección logística depende el Centro de Atención Permanente, donde se reciben y procesan los datos que son remitidos a la Dirección Científica para ser después discutidos en el Comité Científico. En este capítulo analizaremos la estructura y operación del Centro de Atención Permanente, especialmente en sus aspectos más directamente relacionados con la instrumentación.



**Figura 13-1.** Estructura para la gestión de una crisis volcánica. Existe un Comité Científico Asesor creado para la comunicación con la Protección Civil, una Dirección Científica se encarga de la interpretación de los datos, mientras que una Dirección Logística coordina a los distintos grupos de trabajo. Inmediatamente a la declaración de crisis se crea un Centro de Atención Permanente responsable de la adquisición y análisis de los datos.

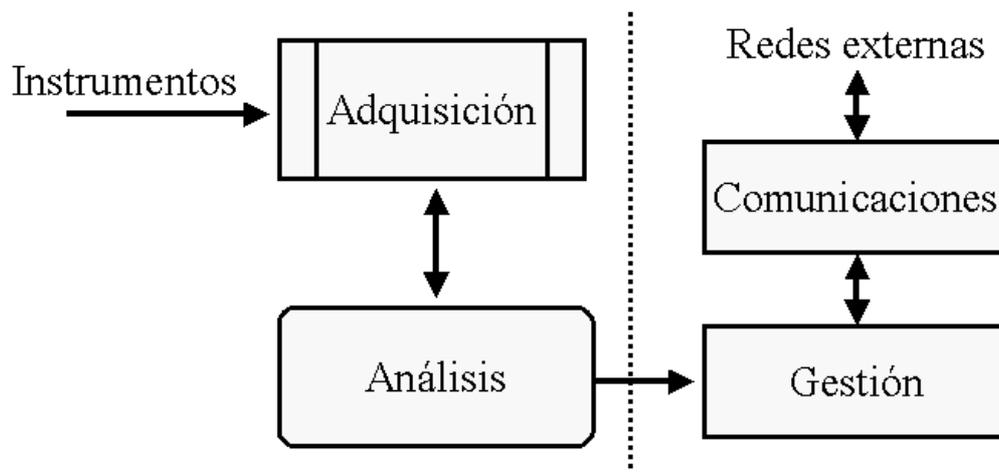
### Centro de Atención Permanente

El concepto de Centro de Atención Permanente recoge en parte la estructura de los Observatorios Volcanológicos tradicionales pero generalizándola a la situación actual, donde los observatorios deben gestionar al seguimiento de muchos volcanes, algunos de ellos separados varios cientos de kilómetros de la sede institucional. En algunos casos ambos conceptos coinciden, por ejemplo el caso del seguimiento de la actividad de un volcán singular por un observatorio permanente. En otros casos, se trata de crear y operar rápidamente una estructura capaz de realizar eficazmente el seguimiento de la actividad del volcán durante el tiempo que sea necesario.

La estructura del Centro de Atención Permanente se deduce directamente de su función: registrar y analizar los datos procedentes de los instrumentos para obtener la información necesaria para la gestión de la crisis y comunicarla a otros estamentos. De este modo la estructura debe considerar cuatro módulos interrelacionados: adquisición, análisis, gestión y comunicaciones. Otro condicionante importante es que el sistema debe operar en todo momento, por lo que deberá ser tolerante a fallos, no dependiendo su funcionamiento de sistemas ajenos susceptibles a fallos, como la energía eléctrica o las comunicaciones telefónicas.

## Sistema de computación

El núcleo del Centro de Atención Permanente, aparte del elemento humano, es el soporte computacional. El sistema debe operar en cualquier circunstancia, por lo que deberá protegerse contra fallos de las líneas de energía o comunicaciones y también contra posibles ataques de virus, especialmente en sus sistemas más críticos. Necesariamente deberemos disponer de un elevado número de computadores, que deberán estar enlazados por red para poder acceder a los distintos datos para su análisis y también se deberá poder acceder a las redes públicas para recibir otro tipo de información (por ejemplo Internet), enviar o recibir fax y mantener comunicaciones telefónicas.

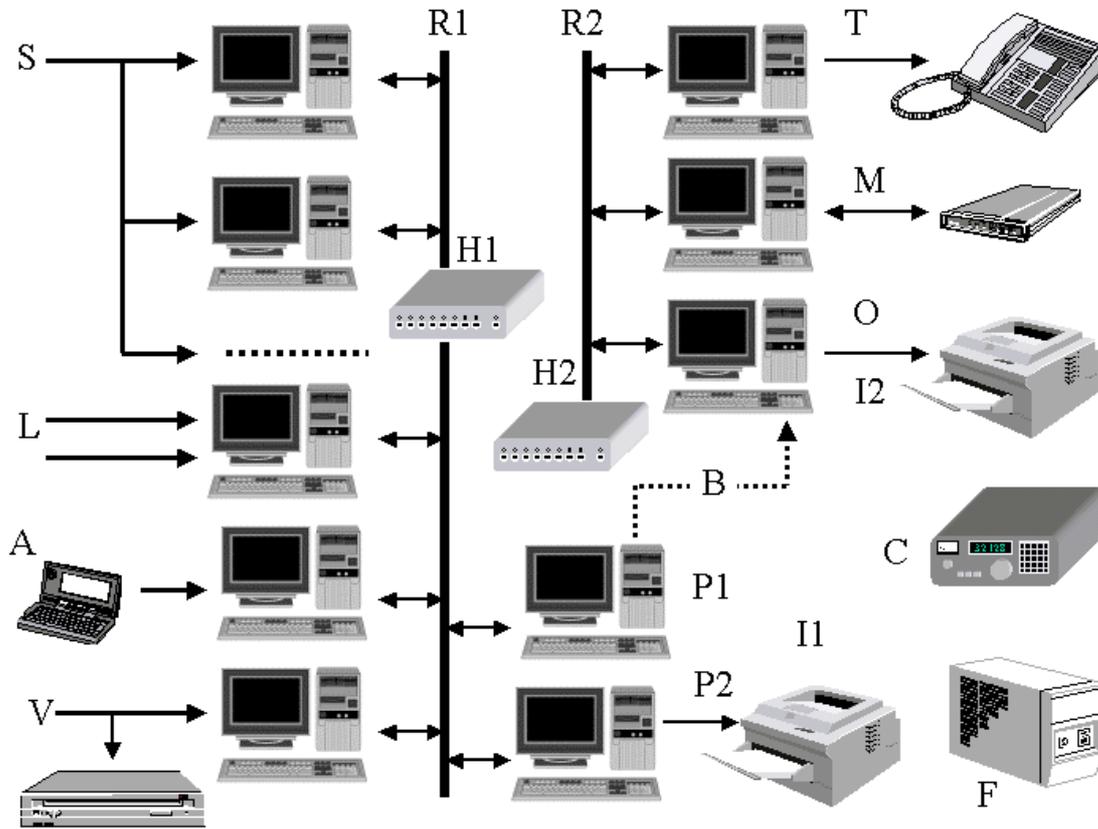


**Figura 13-2.** La figura muestra la estructura del Centro de Atención Permanente: al Centro llegan los datos procedentes de los instrumentos, estos datos deben registrarse y analizarse para obtener la información necesaria para la gestión de la crisis y deben mantenerse comunicaciones con otros estamentos.

Para evitar posibles infecciones por virus es importante que los computadores críticos, como son los dedicados a la adquisición de datos y su análisis estén aislados físicamente de los computadores dedicados a gestión y comunicaciones. Para ello lo mejor es disponer de dos redes, una para cada uno de los ambientes. Como inevitablemente será necesario transferir información de un sistema al otro se utiliza un enlace no convencional para establecer este enlace. En general, será necesario pasar datos o documentos del sistema de adquisición y análisis al de gestión y comunicaciones, el enlace entre ambos sistemas se puede construir físicamente de modo que sólo pueda operar en una dirección, de esta forma es imposible que un virus se propague al sistema crítico. Este enlace se puede realizar fácilmente utilizando un puerto serie y sólo conectar la salida de un computador de procesado con la entrada de uno de gestión.

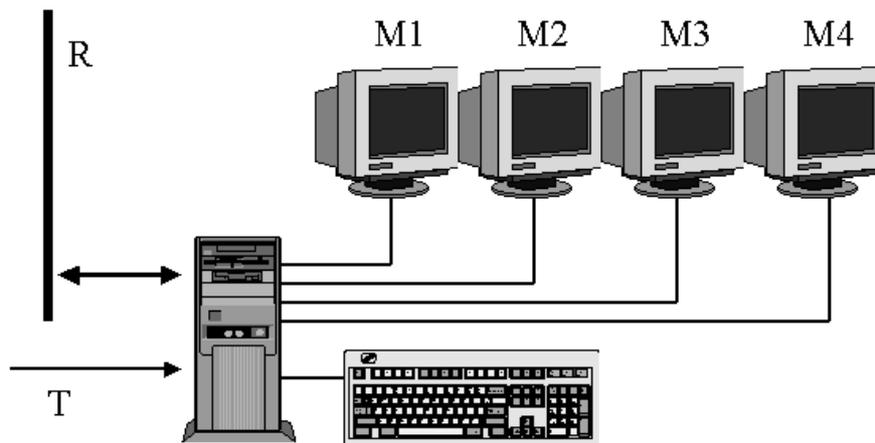
En el sistema de adquisición se dispone de uno (o varios) computadores para el registro continuo de la actividad sísmica, cada uno de estos computadores es conveniente que esté equipado con varios monitores, para poder visualizar simultáneamente varias trazas. Se requiere un computador para el registro de los datos lentos, como son los inclinómetros, termómetros, gases, etc. Es conveniente tener otro computador para la entrada de datos manuales o procedentes de sistemas de registro autónomos, pues de esta forma no se interfiere con las rutinas de adquisición automática de los otros sistemas. En caso de que se disponga de imagen vídeo o cámara automática se necesitará un registro de vídeo y un computador con capacidad de adquisición

automática de imágenes e igualmente se irán incorporando cualquier otro tipo de instrumento susceptible de transmitir la información automáticamente a un computador. En esta misma red debemos disponer los computadores de procesamiento de datos, que al menos deberán ser dos, uno dedicado a la reducción de datos y otro al análisis y modelización.

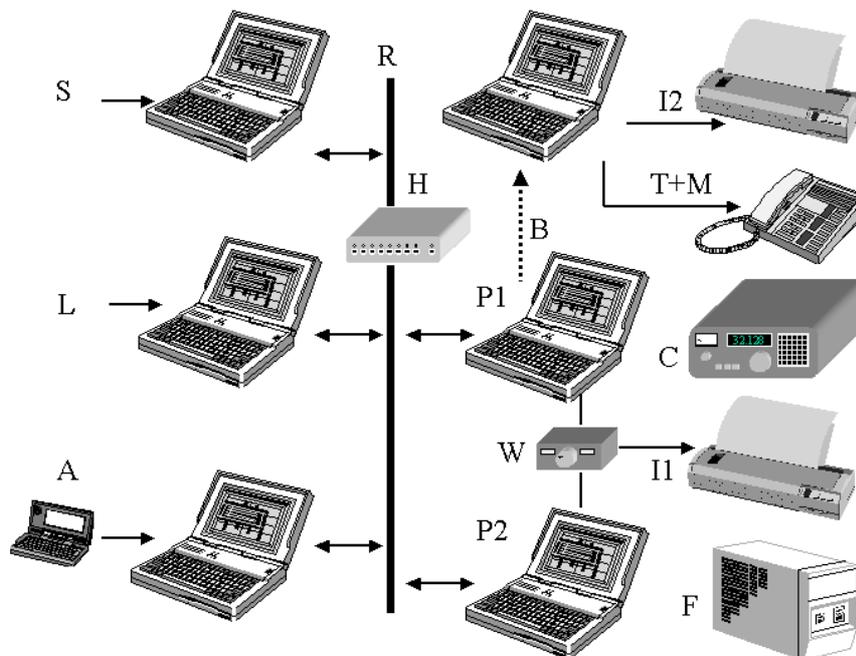


**Figura 13-3.** Estructura computacional del centro de Atención Permanente. Se dispone de dos redes independientes (R1 y R2). Cada una de ellas con su sistema de concentradores (H1 y H2). Se dispone de un sistema de computadores para la sísmica (S), para datos lentos (L) y para sistemas autónomos (A). También se considera el registro de señal de vídeo (V). En esta misma red tenemos los computadores de procesamiento (P1 y P2). La segunda red incluye los computadores para comunicaciones por módem (M), teléfono y fax (T) y de oficina (O). La comunicación entre ambas redes es por un canal unidireccional (B). Se dispone también de un radiotransmisor (C) y del sistema de alimentación auxiliar (F). Además en cada red se requiere al menos una impresora (I1, I2).

La segunda red soporta los computadores para la oficina y el servicio de comunicaciones por módem y teléfono-fax. Es importante que el teléfono este gestionado por un computador, pues de esta forma queda constancia de todas las llamadas efectuadas. Además, en cada red se requiere al menos una impresora. Otros elementos imprescindibles son el sistema de alimentación auxiliar para cubrir los posibles cortes de energía eléctrica y un radiotransmisor para mantener el contacto con los equipos que están trabajando sobre el volcán y las comunicaciones con los otros estamentos en caso de fallo de las comunicaciones telefónicas. Es necesario contar con un pequeño grupo electrógeno para cubrir los cortes de energía, pues un sistema de baterías difícilmente puede mantener en operación toda la instrumentación durante unas pocas horas.



**Figura 13-4.** Es conveniente que los computadores del sistema de adquisición estén equipados con varios monitores. De esta forma es posible visualizar continuamente los distintos datos soportados por cada uno de ellos.



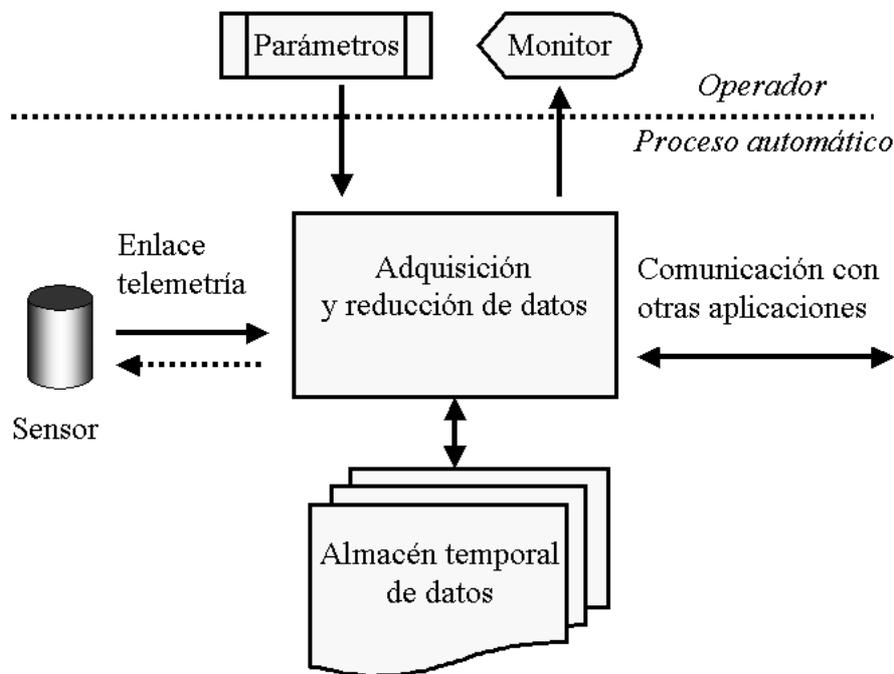
**Figura 13-5.** En ocasiones es necesario desplegar un sistema mínimo, especialmente en demanda energética. Todos los elementos deberán ser portátiles que puedan alimentarse con baterías. Se dispone sólo de una red para adquisición y análisis. Un conmutador permite compartir la impresora.

En muchos casos no es posible operar, por motivos energéticos, una estructura tan compleja como la descrita anteriormente, debiendo utilizarse sistemas de bajo consumo que puedan alimentarse con baterías. En tal caso, se utilizarán computadores portátiles adaptados para poder operar con 12 ó 24 voltios. Se mantendrá al menos la red local para los computadores de adquisición y análisis, pudiendo prescindirse de la segunda red. La comunicación entre el sistema de registro y análisis y el de comunicaciones y gestión se hará con un enlace unidireccional como en el caso anterior.

## Comunicaciones entre aplicaciones

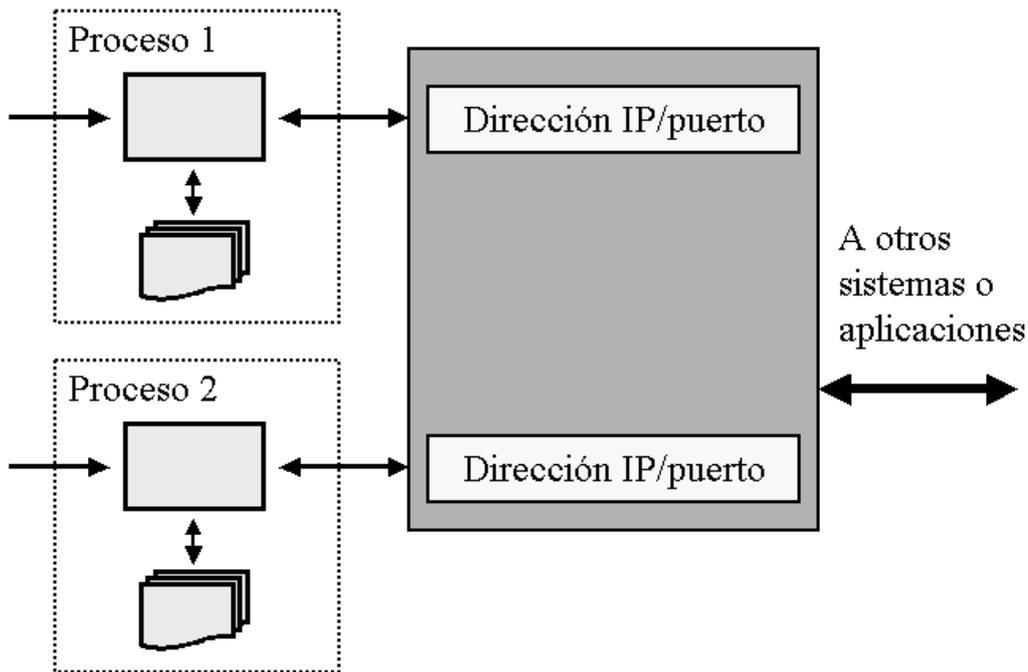
En el seguimiento de una crisis volcánica debe manejarse un gran volumen de datos, de distinta índole, sobre distintos soportes y con técnicas de análisis muy distintas. Es importante tener también claro como deben interrelacionarse los distintos datos y como se pueden integrar en un conjunto para su interpretación global. Al disponer de varios computadores conectados en red, la información puede pasar de un computador a otro, bajo comandos manuales o automáticamente, bajo el control de las distintas aplicaciones. Para obtener el máximo rendimiento del sistema se hace necesario estructurar el conjunto de aplicaciones y definir los intercambios de datos y mensajes entre ellas. Lógicamente, no es posible establecer un sistema que pueda aceptarse universalmente, pues dependerá tanto del conjunto de instrumentos de que se disponga, como del sistema informático, considerando éste en sus dos aspectos de software y hardware. Por este motivo, en este apartado nos limitaremos a describir la estructura del sistema y las bases para su implementación. En general, podemos considerar que en el conjunto de computadores de adquisición y análisis corren aplicaciones que pueden clasificarse en los siguientes tipos:

- Adquisición de datos
- Almacenamiento de datos
- Análisis o reducción automática de datos
- Análisis manual
- Modelización
- Alarmas
- Gestión del sistema



**Figura 13-6.** Esquema de relaciones de una aplicación de adquisición de datos: por una parte está la entrada de datos y su almacenaje, los parámetros de operación y la interacción con el operador. Además puede comunicarse automáticamente con otras aplicaciones.

Se ha separado en dos grupos la adquisición y el almacenamiento de los datos ya que estas funciones pueden efectuarse en computadores distintos. Igualmente, es posible que se realicen automáticamente unas labores de análisis y tratamiento de datos y paralelamente un análisis manual de algunos datos más significativos. Lógicamente, al final deberá establecerse un modelo de evolución sobre el que apoyar el pronóstico de la actividad del volcán. Puede ser que algunas aplicaciones sean capaces de emitir alarmas, por ejemplo: cuando se detecta un evento sísmico de considerable energía o cuando se produce una deformación significativa o el análisis de la cámara de vídeo identifica una posible explosión.



**Figura 13-7.** La comunicación entre aplicaciones es muy sencilla utilizando protocolos UDP. Para ello sólo se requiere asignar una dirección IP a cada computador y definir uno o más puertos para cada aplicación. La dirección estándar 127.0.0.1 significa la misma máquina y facilita la comunicación entre aplicaciones que corren en el mismo computador.

Hoy es posible que una parte importante del informe rutinario se realice automáticamente, sin más que integrar los resúmenes aportados por cada aplicación. Igualmente, es posible mantener automáticamente una página en Internet que muestre la evolución de la actividad y el estado del semáforo. Otro tipo de mensajes pertenece a la gestión del propio sistema, como es controlar que ninguna aplicación se haya quedado colgada o se haya bloqueado un computador.

Cuando se adopta una estructura de este tipo se simplifica en gran manera el desarrollo de las aplicaciones, pues en vez de tener que integrar todos los elementos en una única aplicación podemos ir desarrollando módulos que pueden operar conjuntamente, pero no necesariamente en la misma máquina ni al mismo tiempo. Por ejemplo un sistema de registro sísmico en un volcán activo debería realizar automáticamente, al menos las siguientes funciones:

- Entrada de datos
- Registro continuo de los datos
- Detección automática de eventos significativos (LTA/STA)

- Localización
- Magnitud
- Espectro y clasificación
- Catálogo
- RSAM (amplitud media de la señal sísmica)
- Análisis del temblor (*tremor*)
- Alarmas

Además del análisis manual de los registros obtenidos que en cierta manera repite los puntos anteriores pero utilizando otras herramientas. Implementar un sistema de este tipo es relativamente sencillo desarrollándolo por módulos independientes:

- Una aplicación toma los datos de un puerto y los sitúa en un fichero que se actualiza periódicamente. Todas las otras aplicaciones tienen acceso a este fichero.
- Una aplicación analiza continuamente el fichero de entrada, aplicando una serie de algoritmos de detección. Cada vez que identifica un evento envía un mensaje a las aplicaciones específicas para el tratamiento.
- Si el evento es suficientemente significativo se emite un mensaje de alarma.
- Una aplicación calcula continuamente el RSAM y analiza su evolución temporal.
- Una aplicación analiza el contenido espectral de la señal y su polarización y analiza su evolución.

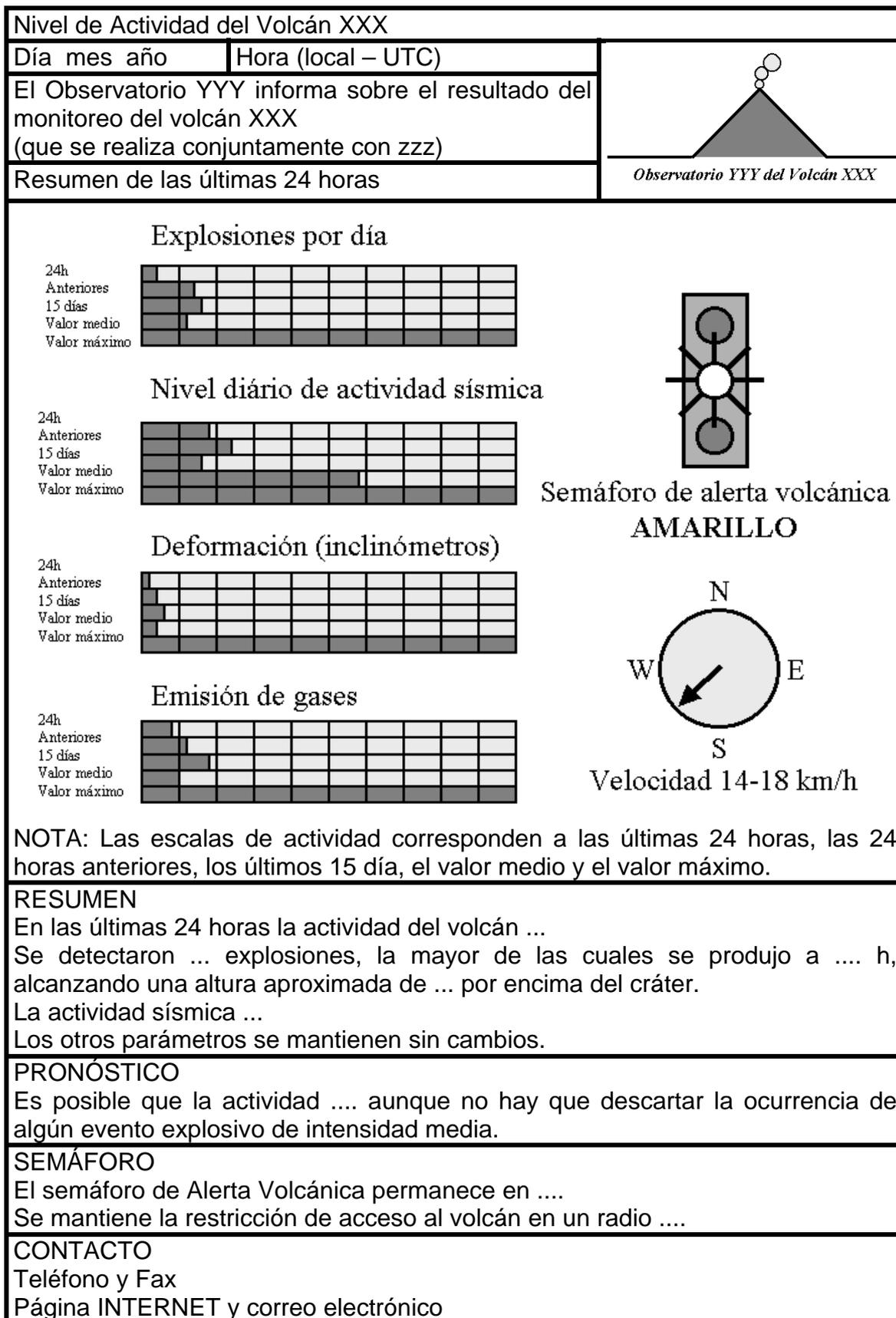
Todas las aplicaciones emiten periódicamente mensajes de estado, de forma que si en un cierto tiempo no se ha recibido un mensaje es señal que la aplicación no opera correctamente.

### **Protocolos de comunicación**

Es importante diseñar el sistema de forma que si se pierde un mensaje o una aplicación deja de operar no se produzca el colapso de todo el conjunto. Por ello es preferible utilizar protocolos más tolerantes como el UDP que otros más estrictos (TCP/IP) que cuando reportan un fallo provocan el bloqueo del sistema. Salvo en casos muy especiales no se deberá utilizar protocolos no estándar, pues aunque presenten algunas ventajas puntuales, impiden utilizar distintas plataformas. En general podremos utilizar protocolos UDP mientras todos los mensajes estén contenidos dentro de la misma red, pero deberemos acudir a protocolos TCP/IP cuando debamos poner en comunicación máquinas que están en distintas redes. Hoy todos los lenguajes de programación (C++, Borland Builder C++, Visual Basic, etc.) ofrecen librerías y funciones para implementar fácilmente estos protocolos.

### **Información de acceso público durante una crisis**

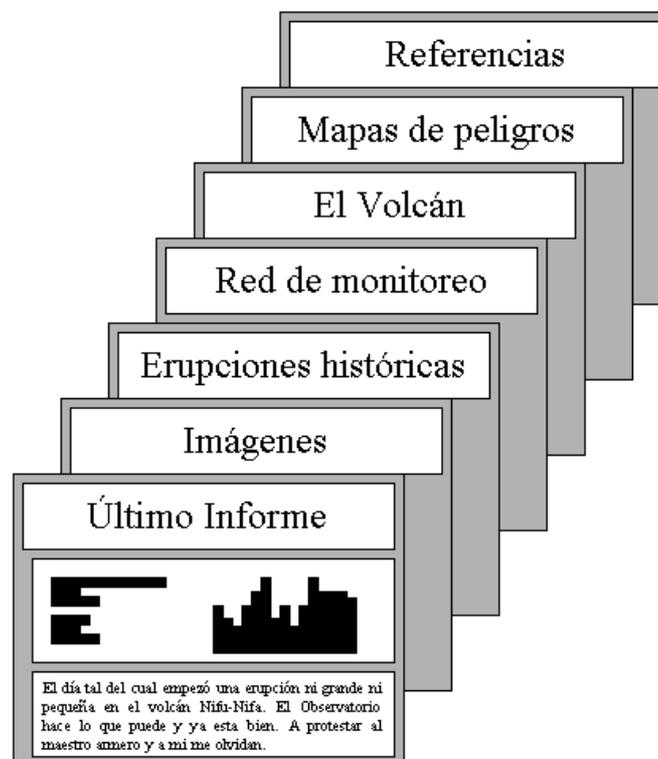
La sociedad actual requiere información sobre cualquier suceso que le afecte, si esta información no esta disponible y adecuadamente actualizada, surgirán inmediatamente espontáneos que vendrán a cubrir esa necesidad, con todas las consecuencias que este proceder acarreará necesariamente.



**Figura 13-8.** Ejemplo de resumen de acceso público de la actividad de un volcán. Basado en la página INTERNET del CENAPRED (México)

Las crisis volcánicas ocurridas en el 2001 pueden servir de ejemplo: la erupción del Etna fue ampliamente cubierta por los distintos medios informativos, pero no existía una dirección Internet de acceso fácil, donde obtener la información oficial debidamente actualizada, a pesar de que existía una página del POSEIDÓN, estamento oficial de la Protección Civil en el Etna. Este hueco lo vinieron a cubrir múltiples espontáneos con mayor o mejor voluntad y conocimiento. Al contrario, la actividad del volcán mexicano Popocatepetl pudo ser seguida diariamente a través de la página oficial del CENAPRED, Centro Nacional de Prevención de Desastres de México, donde se presenta un resumen de la actividad eruptiva, de la sismicidad, deformación y emisión de gases, además de las recomendaciones de seguridad para la zona y el pronóstico para las próximas horas.

Estas páginas pueden diseñarse de forma que su actualización sea casi automática, y de esta forma no requerir atención especial durante las crisis, donde todos los implicados se encuentran generalmente desbordados. Una página donde se recojan el resumen de los datos (proceso automático) más los comunicados oficiales sobre el estado actual y la evolución prevista es suficiente. Siempre que se actualice al menos diariamente. Evidentemente si esto no está diseñado de antemano, cuando llegue la crisis será absolutamente imposible hacerlo. Mucha de la información que se busca durante una crisis puede prepararse con antelación. Las características del volcán, sus erupciones históricas, los mapas topográficos y de peligros, la red de monitoreo, una colección de imágenes, etc, es material muy fácil de preparar en periodos de reposo e imposible durante una crisis. Hoy no es difícil añadir automáticamente y de forma periódica una imagen del volcán.



**Figura 13-8.** Ejemplo de página para informar de la evolución de una crisis volcánica: salvo el informe el resto puede estar preparado de antemano. En general, se permite también la consulta a los informes anteriores.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. (1972) Handbook of mathematical functions. Dover Publications, New York. 1046 pp.
- ABELLA, R.; ZLOTNICKI, J.; GARCÍA, A. (2000) *Volcanomagnetismo*. En Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica. Astiz, M.; García, A.; (editores). Cabildo de Lanzarote. Servicio de Publicaciones. 325-340
- ABRIL, M.; IBAÑEZ, J. (2000) *Uso de antenas sísmicas en ambientes volcánicos*. En Astiz, M.; García, A. (editores) Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica Cabildo de Lanzarote. Servicio de Publicaciones. 283-296
- AGNEW, D. C. (1986) *Strainmeters and tiltmeters*. Reviews of Geophysics 34: 579-624
- ALGUACIL, G. (1986). Los instrumentos de una red sísmica local telemétrica para microterremotos. La Red Sísmica de la Universidad de Granada. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 228 pp.
- ALGUACIL, G.; ALMENDROS, J.; DEL PEZZO, E.; GARCÍA, A.; IBAÑEZ, J.; LA ROCCA, M.; MORALES, J.; ORTIZ, R. (1999) *Observations of volcanic earthquakes and tremor at Deception Island-Antarctica*. Annali di Geofisica, Vol.42, N.3. 1999: 417-436
- ALMENDROS, F.; IBAÑEZ, J.; ALGUACIL, G.; DEL PEZZO, E.; ORTIZ, R. (1997) *Array tracking of the volcanic tremor source at Deception Island, Antarctica*. Geophysical Research Letters. 34. 23: 3069-3072
- ALMENDROS, F. J. (1999) Análisis de señales sismovolcánicas mediante técnicas de array. Tesis doctoral. Universidad de Granada. 302 pp.
- ALMENDROS, J.; IBAÑEZ, J. M.; ALGUACIL, G.; MORALES, J.; DEL PEZZO, E.; LA ROCCA, M.; ORTIZ, R.; ARAÑA, V.; BLANCO, M. J. (2000). *A double seismic antenna experiment at Teide Volcano: Existence of local seismicity and lack of evidences of volcanic tremor*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 103: 439-462
- ARAÑA, V.; ORTIZ, R. (1984) Volcanología. Rueda-CSIC Madrid, 528 pp.
- ASTEN, M.W.; HENSTRIDGE, J.D. (1984). *Array estimators and the use of microseism for reconnaissance of sedimentary basins*. Geophysics, 49: 1828-1837.
- ASTIZ, M.; GARCÍA, A. (2000) Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica. Cabildo de Lanzarote. Servicio de Publicaciones. 458 pp.
- BARBERI, F.; BLONG, R.; DE LA CRUZ, S.; HALL, M.; KAMO, K.; MOTHES, P.; NEWHALL, C.; PETERSON, D.; PUNONGBAYAN, P.; SIGVALSON, G.; ZANA, N. (1990) *Reducing volcanic disasters in the 1990's*. Bull. Volcanol. Soc. Japan. 35: 80-95
- BAER, M.; KRADOLFER, U. (1987) *An automatic phase picker for local and teleseismic events*. Bull. Seism. Soc. Am. 1437-1445
- BANKS, N.G.; TILLING, R.I.; HARLOW, D.H.; EWERT, J.W. (1989) *Volcano monitoring and short term forecasts*. en Tilling, R.I. Edit. Volcanic hazards. Short course in geology: Volume 1. American Geophysical Union. Washington DC. U.S.A 51-80
- BARTOSCH, T.; SEIDL, D. (1999). *Spectrogram analysis of selected tremor signals using short-time Fourier transform and continuous wavelet transform*. Ann. Geofis. 42 (3): 497-506.
- BEDSTED A. O. 1989.- Modern techniques in Geodesy and Surveying. Kort-Og Matrikelstyrelsen. National Survey and Cadastre. Copenage, Dinamarca 478 pp.
- BROWN, G.; RYMER, H. (1991) *Microgravity monitoring at active volcanoes: A review of theory and practice*. Cahiers du Centre Européen de Geodynamique et de Séismologie, 4 279-304

- BURRUS, C.S.; GOPINATH, R.A.; GUO, H. (1998). *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer*. Prentice Hall. New Jersey. 267 pp.
- BYRNE, C. J. (1961). *Instrument noise in seismometers*. Bull. Seism. Soc. Am. 51. 69-84.
- CAPON, J. (1969). High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. Proc. IEEE, **57**: 1408-1418.
- CHIODINI, G.; CIONI, R. (1989) *Gas geobarometry for hydrothermal systems and its application to some Italian geothermal areas*. Applied Gechemistry 4 465-472
- CHOUET, B. A. (1996). Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting. Nature, 380: 309-316.
- CHOUET, B.A.; SACCOROTTI, G.; MARTINI, M.; DAWSON, P.; DE LUCA, G.; MILANA, G.; SCARPA, R. (1997). *Source and path effects in the wave fields of tremor and explosions at Stromboli Volcano, Italy*. Journ. Geophys. Res., 102: 15129-15150.
- CHOUET, B.; DAWSON, P.; DE LUCA, G.; MARTINI, M.; MILANA, G.; SACOROTTI, G.; SCARPA, R.; (1998) Array analyses of seismic wavefields radiated by eruptive activity at Stromboli Volcano, Italy. CNR. Gruppo Nazionale per la Vulcanologia. Roma. 158 pp.
- CIONI, R.; TADDEUCCI, G. (1994) Continuous geochemical monitoring of volcanoes. State of the art. EVOP Monograph N1-1. European Science Foundation, European Volcanological Project (EVOP).
- CLIMER, J. R. (1990) System analysis using simulation and Markov models. Prentice Hall International Editions New Jersey. 352 pp.
- CORNELIUS, R. R.; B. VOIGHT. (1995) *Graphical and PC-software analysis of volcano eruption precursors according to the Materials Failure Forecasting Method (FFM)*. J. Vol., Geotherm. Res 64:295-320.
- COSTA, P.; LUONGO, G.; PANE, G.; TORO, S. (1989) VOLCAN: Un sistema esperto per la valutazione del rischio vulcanico. Osservatorio Vesuviano-Datitalia Processing S.pA. Napoli. 20 pp
- DAILEY, D. (1989) Operational amplifiers and linear integrated circuits. McGraw-Hill, Pennsylvania, U.S.A. 418 pp.
- DANIEL, R. (1979). *An intermediate-period field system using a short-period seismometer*. Bull. Seism. Soc. Am. 69, 1623-1626.
- DAUBECHIES, I. (1992). *Ten Lectures on Wavelets*. Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia. 357 pp.
- DEL PEZZO, E.; LA ROCCA, M.; IBÁÑEZ, J.M. (1997). *Observations of high-frequency scattered waves using dense arrays at Teide volcano*. Bull. Seism. Soc. Am., 87: 1637-1647.
- DE LOS REYES, P.J. (1992) *Volunteer observers program: a tool for monitoring volcanic and seismic events in the Philippines*. En Geohazards. Natural and man-made. McCall, Laming, Scott, (editors). Chapman & Hall, Londres. 13-24
- DEL NEGRO, C.; FERRUCCI, F.; NAPOLI, R. (1992) *Retrival of large volcanomagnetic effects observed during the 1981 eruption of Mt. Etna*. Annali di Geofisica. XL. 2. 547-538
- DI MAIO, R.; MAURIELLO, P.; PATELLA, D.; PETRILLO, Z.; PISCITELLI, S.; SINISCALDI, A.; VENERUSO, M. (1992) *Self-potential, geoelectric and magnetotelluric studies in Italian active volcanic areas*. Annali di Geofisica. XL. 2. 519-538
- DOST, B. (1988). *The NARS array. A seismic experiment in Western Europe*. Geologica Ultraiectina,. Instituut voor Aardwetenschappen der Rijksuniversiteit te Utrecht. 47, 117

- DOUKAS M.P.; EWERT, J.W. 1993.- *Instalación de hitos y reflectores permanentes para redes geodésicas de deformación*. En Vigilando volcanes: técnicas y estrategias empleadas por el personal del Observatorio Volcanológico Cascades 1980-90. Ewert J. y Swanson (editores). U.S. Geological Survey Bulletin 1966. Cascades Volcano Observatory 5400 MacArthur Blvd. Vancouver 98661 U.S.A. 125-134
- DZURISIN, D. 1993.- *Nivelación geodésica como herramienta para estudiar volcanes*. En Vigilando volcanes: técnicas y estrategias empleadas por el personal del Observatorio Volcanológico Cascades 1980-90. Ewert J. y Swanson (editores). U.S. Geological Survey Bulletin 1966. Cascades Volcano Observatory 5400 MacArthur Blvd. Vancouver 98661 U.S.A. 135-146
- DZURISIN, D. (1993) *Inclinómetros electrónicos para la vigilancia de volcanes: lecciones del Mount St. Helens*. Vigilando volcanes: técnicas y estrategias empleadas por el personal del Observatorio Volcanológico Cascades 1980-90. En Ewert J. y Swanson (editores). U.S. Geological Survey Bulletin 1966. Cascades Volcano Observatory 5400 MacArthur Blvd. Vancouver 98661 U.S.A. 75-90
- ENDO, T. E.; MURRAY, T. (1991) *Real-time Seismic Amplitude Measurement (RSAM). A volcano monitoring and prediction tool*. Bull Volcanol. 53 533-545
- ETIOPE, G.; CALCARA, M.; QUATTROCCHI, F. (1997) *Seismogeochemical algorithms for earthquake prediction: an overview*. Annali Geofisica. 1483-1492
- EWERT, J. W. (1993) *Un método de nivelación trigonométrica de montaje único para vigilar cambios en la inclinación del suelo*. En Vigilando volcanes: técnicas y estrategias empleadas por el personal del Observatorio Volcanológico Cascades 1980-90. Ewert J. y Swanson (editores). U.S. Geological Survey Bulletin 1966. Cascades Volcano Observatory 5400 MacArthur Blvd. Vancouver 98661 U.S.A. 163-170
- ESF-EVOP WORKING GROUP (1994) Automated Systems for Volcano Monitoring. European Science Foundation. Strasbourg. EVOP Monograph 2 20pp
- FABER, E.; INGUAGGIATO, S.; GARZON, G.; SEIDL, D. (1988) *Continuous gas measurements at volcanic fumaroles*. Deutsche Geophysikalische Gesellschaft. 83-87
- FABER, E.; PONGGENBURG, J.; GARZON, G.; MORÁN, C.; INGUAGGIATO, S. (2000) *Gas monitoring at volcanoes*. Deutsche Geophysikalische Gesellschaft. 77-80
- FALSAPERLA S., GRAZIANI S. NUNNARI G., SPAMPINATO S., (1996) *Classification of volcanic earthquakes by using multilayer neural networks*, Natural Hazards, 13, 205-228
- FERRAZZINI, V.; AKI, K.; CHOUET, B.A. (1991). Characteristics of seismic waves composing hawaiian volcanic tremor and gas-piston events observed by a near-source array. Journ. Geophys. Res., 96: 6199-6209.
- FERRAZZINI, V.; AKI, K. (1992). Preliminary results from a field experiment on volcanic events at Kilauea using an array of digital seismographs. En Volcanic Seismology, editado por K.Aki, P. Gasparini, and R. Scarpa. Springer-Verlag, Berlin: 168-189.
- FRANKEL, A.; HOUGH, S.; FRIBERG, P.; BUSBY, R. (1991). *Observations of Loma Prieta aftershocks from a dense array in Sunnyvale, California*. Bull. Seism. Soc. Am., 81: 1900-1922.
- FOREMAN, P. (1994) *Warning systems and pilot actions*. En Volcanic ash and aviation safety. Casadevall, T. Edit. US Geological Survey Bulletin 2047. 163-168
- FRANKS, L.E. (1975) Teoría de la señal. Ed. Reverte, Barcelona. 377 pp.

- FREEDMAN, J. A.; SKAPURA, D. (1993) Redes neuronales. Algoritmos, aplicaciones y técnicas de programación. Addison Wesley/Diaz de Santos. Madrid. 431 pp.
- FERNANDEZ, J.; VAN RUYMBEKE, M.; VIEIRA, R. (1991) *High precision thermal measurements. Geodynamical Instrumentation applied to volcanic areas*. Cahiers de Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie 4: 215-228
- GARCÍA A., BLANCO I., TORTA J.M., ASTIZ M., IBAÑEZ J., ORTIZ R. (1997) *A search for the volcanomagnetic signal at Deception Volcano (South Shetland I., Antarctica)* Annali di Geofisica. VOL.XL, N.2 319-328
- GARCÍA, A.; ASTIZ, M.; ORTIZ, R. (2000) *Atención de una crisis volcánica*. En Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica. Astiz, M.; García, A.,(EDITORES). Cabildo de Lanzarote. Servicio de Publicaciones. 227-242
- GARCÍA, J.; FERRANDO, S.; PIATTINI, M. (1997) Redes para proceso distribuido. RA-MA. Madrid. 718 pp.
- GIGGENBACH, W. F. (1975) *A simplified method for the collection and analysis of volcanic gas samples*. Bull. Volcanol. 39: 132-145
- GIGGENBACH, W. F. (1996) *Chemical composition of volcanic gases*. En Monitoring and mitigation of volcano hazards. Scarpa, R.; Tilling, R. I., editors. Springer-Verlag, Berlin. 841. 221-256
- GREINWALD, S.; ESTUPINAN, A.; MONTENEGRO, R. (2000) *Electric measurements at the Galeras volcano*. Deutsche Geophysikalische Gesellschaft. 81-86
- GOLDSTEIN, P.; ARCHULETA, R.J. (1987). *Array analysis of seismic signals*. Geophys. Res. Lett., **14**: 13-16.
- GOLDSTEIN, P.; CHOUET, B.A. (1994). *Array measurements and modeling of sources of shallow volcanic tremor at Kilauea Volcano, Hawaii*. Journ. Geophys. Res., 99: 2637-2652.
- HAMAMATSU PHOTONICS K. K. (1999) Solid State Division. Catalog Ichino-Cho, Japon 21 pp.
- HAYKIN, S. (1989) Modern filters. MacMillan Publishing. Ontario, 389 pp
- HURST, A. W.; CHRISTOFFEL, D. A. (1973) *Surveillance of White Island Volcano. 1968-1972. Part 3.- Thermo magnetic effects due to volcanic activity*. N. Z. Jl. Geol. Geophys., 16 965-972.
- IBAÑEZ, J. M.; MORALES, J.; ALGUACIL, G.; ALMENDROS, J.; ORTIZ, R.; DEL PEZZO, E. (1997). *Intermediate-focus earthquakes under South Shetland Islands (Antarctica)*. Geophys. Res. Lett., **24**: 531-534.
- IBAÑEZ, J.; CARMONA, E. (2000) *Sismicidad volcánica*. En Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica. Astiz, M.; García, A.,(EDITORES). Cabildo de Lanzarote. Servicio de Publicaciones. 269-282
- IBAÑEZ, J.; DEL PEZZO, E.; ALMENDROS, J.; LA ROCCA, M.; ALGUACIL, G.; ORTIZ, R.; GARCÍA, A. (2000) *Seismovolcanic signals at Deception Island volcano, Antarctica: Wave field analysis and source modeling*. Journal of Geophysical Research. Vol 105 B6 13905-13931
- INTERSIL (1986) Component Data Catalog. Intersil, Inc. 10600 Ridgeview Cupertino, CA 95014, U.S.A.
- IWATSUBO, E.Y., EWERT, J.W.; MURRAY, T.L. (1993) *Vigilando la deformación de grietas radiales con medidores de desplazamiento*. en Ewert J. y Swanson (editores), Vigilando volcanes: técnicas y estrategias empleadas por el personal del Observatorio Volcanológico Cascades 1980-90. U.S. Geological Survey Bulletin 1966. Cascades Volcano Observatory 5400 MacArthur Blvd. Vancouver 98661 U.S.A. 103-110

- IWATSUO, E.Y.; SWANSON, D. (1993) *Técnicas de trilateración y medidas de distancias usadas en Cascades y otros volcanes*. En Vigilando volcanes: técnicas y estrategias empleadas por el personal del Observatorio Volcanológico Cascades 1980-90. Ewert J. y Swanson (editores), U.S. Geological Survey Bulletin 1966. Cascades Volcano Observatory 5400 MacArthur Blvd. Vancouver 98661 U.S.A. 111-124
- KAISER, G. (1994). *A Friendly Guide to Wavelets*. Birkhäuser. Boston. 300 pp.
- KOMHYR, W. D.; WATERMAN, L. S.; TAYLOR, W. R. (1983) *Semiautomatic non dispersive infrared analyser apparatus for carbon dioxide air sample analyses*. J. Geophys. Res. 88, 1315-1322
- KRESHKOV, A.; YAROSLAVTSEV, A. (1985) Curso de Química Analítica. Análisis Cuantitativo. Editorial MIR. Moscú.
- LACOSS, R.T.; KELLY, E.J.; TOKSOZ, M.N. (1969). *Estimation of seismic noise structure using arrays*. Geophysics, 34: 21-38.
- LANGER H., NUNNARI G, OCCHIPINTI L. (1996) *Estimation of seismic waveform governing parameters with neural networks*, Journal of Geophysical Research, Vol. 101 B9, 20.109-20.118
- LARDY, M.; TABAGH, A (1999) *Measuring and interpreting head fluxes from shallow bodies using vertical temperature profiles: a preliminary test*. Bull. Volcanol. 60: 441-447
- LENAT, J. P. (1995) *Geoelectrical methods in volcano monitoring*. En Monitoring Active Volcanoes: Strategies, procedures and techniques, McGuire, Kilburn, Murray (editores), UCL Press London, 248-274.
- LESAGE P.; VANDEMEULEBROUCK J.; HALBWACHS M. (1995) *Data acquisition and telemetry*. En Monitoring Active Volcanoes: Strategies, Procedures, and Techniques, McGuire, Kilburn, Murray, (editores). UCL Press, Londres. 93-112
- LIFERMANN, J. (1979) Les methodes rapides de transformation du signal: Fourier, Wals, Hadamard, Haar. Masson, Paris, 198 pp.
- LEE, W.; STEWART, S. (1981) Principles and application of microearthquake networks. Academic Press, New York. 293 pp.
- LINGANE, I.M. (1954) Electroanalytical Chemistry. Interscience Publishers, Inc. New York. U.S.A. 20 Ed.
- LODDO, M.; PATELLA, D.; QUARTO, R.; RUINA, G.; TRAMACERE, A.; ZITO, G. (1989) *Application of gravity and deep dipole geoelectrics in the volcanic area of Mt. Etna (Sicily)*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 39 17-39
- MACHADO, F. (1974) *The search for magmatic reservoirs*. En Physical Volcanology. Civetta, L.; Gasparini, P. Luongo, G.; Rapolla, A. (editores). Elsevier. Amsterdam. 255-273
- MARK PRODUCTS. (1987) Geophone general information. Mark Products. Houston 18 pp.
- MARTINI, M. (1993) *Gases volcánicos*. En: La volcanología actual. Martí, J. Araña, V. (editores). CSIC, Madrid 387-444
- MARTINELLI, B. (1997). *Volcanic tremor and short-term prediction of eruptions*, J. Volcanol. Geotherm. Res., **77**: 305-311.
- MARTINI, M.; GIANNINI, L. (1988) *Deception Island (South Shetlands): an area of active volcanism in Antarctica*. Mem. Soc. Geol. It., 43, 117-122
- MARVEN, C.; EWERS, G (1993) A simple approach to digital signal processing. Texas Instruments. Alden Press, Oxford, U.K. 233 pp
- MAXIM INTEGRATED LTD. (1992) New releases data book. 21C Horseshoe Park, Pangbourne Reading RG87JW U.K.

- McChesney, P. J. (1999) *McVCO Handbook 1999*. USGS Open File Report 99-361 51 pp.
- MCNUTT, S. R. (1996) *Seismic monitoring and eruption forecasting of volcanoes: A review of the state of the art and case histories*. En Monitoring and mitigation of volcano hazards. Scarpa, R.; Tilling, R. I., (editores) Springer-Verlag, Berlin. 99-146.
- METAXIAN, J.P.; LESAGE, P.; DOREL, J. (1997). *Permanent tremor of Masaya volcano, Nicaragua: wave field analysis and source location*. Journ. Geophys. Res., 102: 22529-22545.
- MINAKAMI, T. (1974) *Seismology of volcanoes in Japan*. En Physical Volcanology. L. Civetta, P. Gasparini, G. Luongo, A. Rapolla (editores). Elsevier.. Amsterdam 1-27
- MOLERO, F.; NÚÑEZ, L.; PUJADAS, M.; JAQUE, F. (2000) *Design of a differential absorption lidar (DIAL) system and assessment of its performance*. Anales de Física 95: 229-239
- MURRAY, T. L.; EWERT, J. W.; LOCKHART, A. B.; LAHUSEN, R. G. (1996) *The integrated Volcano Monitoring System used by the Volcano Disaster Assistance Program (VDAP)*. En Scarpa, R.; Tilling, R. I., (editores) Monitoring and mitigation of volcano hazards. Springer-Verlag, Berlin. 841 315-362.
- NATALE G. DE; PINGUE F. (1996) *Ground deformation modeling in Volcanic areas*. En Monitoring and mitigation of volcano hazards. Scarpa, R.; Tilling, R. I., (editores) (1996) Springer-Verlag, Berlin. 365-388.
- NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION (1989) Data Acquisition Linear Devices. Databook. National Semiconductor Corporation. 2900 Semiconductor Drive. P.O. Box 58090. Santa Clara, C.A. 95052-8090. U.S.A.
- NURNBERG, H.W. (1974) Electroanalytical Chemistry. John Wiley & Sons, Inc. New York. U.S.A.
- ONODERA, S.; KAMO, K. (1994) *Aviation safety measures for ash clouds in Japan and the system of Japan Air lines for the monitoring eruptions at Sakurajima volcano*. En Volcanic ash and aviation safety. Casadevall, T. (editores). US Geological Survey Bulletin 2047. 213-220
- ORTIZ, R. (1996) Riesgo Volcánico. Serie Casa de los Volcanes. Cabildo de Lanzarote 304pp.
- ORTIZ, R. (2000) *Técnicas instrumentales para la vigilancia de volcanes activos*. En Astiz, M.; García, A. (editores) Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica Cabildo de Lanzarote. Servicio de Publicaciones. 227-242
- ORTIZ, R.; GARCÍA, A. (2000) *Seguimiento y pronóstico de erupciones*. En Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica. Astiz, M.; García, A.; (editores). Cabildo de Lanzarote. Servicio de Publicaciones. 215-226
- ORTIZ, R.; CORREIG, A. M. (1991). *On the use of geophones with extended response in microseismic networks*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. 4: 127 - 143
- OSKARSSON, N (1996) *Volcanic components in groundwater: monitoring and interpretation*. En The mitigation of Volcanic hazards. Barberi, F.; Casale, R.; Fantechi, R.(editores). European Commission DG XII. Bruselas. 393-402
- OSCARSON, N.; PALSSON, K.; OLAFSSON, H.; FERREIRA, T. (1999) *Experimental monitoring of carbon dioxide by low power IR- Sensors: soli degassing in the Furnas Volcanic Centre, Azores*. J. Volcanol. Geotherm. Res 181-193
- PICCARDI, G.; CELLINI-LEGITTIMO, P. (1983) *A sampling and chemical analysis procedure for fumarolic gases*. Mikrochimica Acta [Wien], II, 159-167.
- PÉREZ, J.; HILARIO, A.; CASTRO, M.; MUR, F.; YEVES, F.; PEIRE, J. (1998) *Simulación y electrónica analógica. Prácticas y problemas*. RA-MA, Madrid 888 pp.

- PRESS, W. H.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, T. W.; FLANNERY, B., P. (1992) Numerical Recipes in C. Cambridge University Press. Cambridge 994 pp.
- PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. (1997). Tratamiento digital de señales. Principios, algoritmos y aplicaciones. Prentice Hall. Madrid, 976 pp.
- QUATTROCCHI, F.; CALCARA, M.; PORFIDIA, B. (1997) *A prototype radonmeter for seismic surveillance*. *Annali di Geofísica*. XL 6: 1997
- RAY, J. (1999) Edición especial TCP/IP. Prentice Hall. Madrid. 936 pp.
- RAYMER, H. (1995) *Microgravimetry monitoring*. En Monitoring Active Volcanoes: Strategies, Procedures, and Techniques McGuire, Kilburn, Murray, (editores). UCL Press. Londres. 217-247
- RAYMER, H. (1996) *Microgravimetry monitoring*. En Monitoring and mitigation of volcano hazards. Scarpa, R.; Tilling, R. I., (editores). Springer-Verlag, Berlin. 169-198.
- REBSCHER, D.; WESTERHAUS, M.; KÖRNER, A.; WELLW, W.; BRODSCHOLL, A.; KÜMPPEL, H.; ZSCHAU, J. (2000) *Indonesian German multiparametric stations at Merapi volcano*. Deutsche Geophysikalische Gesellschaft. 93-102
- REIDSESEL, M. A; MOORE, R. D.; ORCUTT, J. A. (1990). *Limits of sensitivity of inertial seismometers with velocity transducers and electronic amplifiers*. *Bull. Seism. Soc. Am.* 80, 1725-1752.
- RIOUL, O.; VETTERLI, M. (1995). *Wavelets and Signal Processing*. Signal Processing Technology and Applications. Ackenhusen, J.G.; editor. IEEE Technical Activities Board. New York. pp. 85-109.
- ROTHERY, D.A. (1992) *Monitoring and warning of volcanic eruptions by remote sensing*. En Geohazards. Natural and man-made. McCall, Laming; Scott, (editores) Chapman & Hall, Londres. 227 pp.
- ROBERTS, P. (1989) *A versatile equalization circuit for increasing seismometer velocity response below the natural frequency*. *Bull. Seism. Soc. Am.* 79: 1607-1617
- RODGERS, P.W. (1992). *Frequency limits for seismometers as determined from signal-to-noise ratios. Part 1. The electromagnetic seismometer*. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 1071-1098.
- ROGERS, J. A.; STEPHENS, J. A. (1995) *SSAM Real Time Seismic Spectral Amplitude Measurement on PC and its application to volcano monitoring*. *Bull. Seism. Soc. Am.* 85 632-639
- SABROUX, J.C.; VILLEVIELLE, A.; DUBOIS, E.; DOYOTTE, C.; HALBWACHS, M.; VANDEMEULEBROUCK, J. (1990) *Satellite monitoring of the vertical temperature profile of Lake Nyos, Cameroon*. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 42 381-384
- SCARPA, R.; TILLING, R. I., (editores) (1996) Monitoring and mitigation of volcano hazards. Springer-Verlag, Berlin. 841 pp.
- SACCOROTTI, G.; CHOUET, B.; MARTINI, M.; SCARPA, R. (1998). *Bayesian statistics applied to the location of the source of Stromboli volcano, Italy*. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88: 1099-1111.
- SCOPEFIR (1998) A comprehensive tool for Finite Impulse Response (FIR) filter design v3.4 Iowegian International Corporation. <http://www.iowegian.com>
- SEIDL, D.; KIRBANI, S.B.; BRÜSTLE, W. (1990) *Maximum entropy spectral analysis of volcanic tremor using data from Etna (Sicily) and Merapi (central Java)*. *Bull. Volcanol.* 52 460-474
- SEDRA, A.; BRACKETT P. (1978) Filter theory and design: active and pasive. Matrix publishers. Oregon, U.S.A. 785 pp.
- SEGALL, P.; DAVIS, J. (1997) *GPS applications for geodynamics and earthquake studies*. *Annu. rev. Earth Planet. Scie.* 25: 301-336

- SHIMOIKE, Y.; NOTSU, K. (2000) *Continuous chemical monitoring of volcanic gas in Izu-Oshima volcano, Japan*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 101: 211-221
- SCHICK, R.(1992). *Volcanic tremor: seismic signals of (almost) unknown origin*, in *Volcanic Seismology* (IAVCEI Proceedings in Volcanology 3), Aki, K., Gasparini, P.; Scarpa, R. (editores.), Springer-Verlag: 157-167.
- SIGMUNDSSON, F. (1996) *Crustal deformation of volcanoes*. En The mitigation of Volcanic hazards. Barberi, F.; Casale, R.; Fantechi, R.(editores). European Commission DG XII. Bruselas. 237-258
- SKOOG, D. A.; LEARY, J. J. (1995) *Análisis instrumental*. McGraw-Hill, Madrid. 935 pp
- SODERQUIST, D. (1979). *Minimization of noise in operational amplifier applications*. AN-15. En 1981 Full Line Catalogue. Precision Monolithics Inc. Suiza.
- SOMERHAUSEN, A. (2000) *Diseño de software para aplicaciones en tiempo real*. En Astiz, M.; García, A. (EDITORES). Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica Cabildo de Lanzarote. Servicio de Publicaciones. 227-242
- STEIM, J.M.; WIELANDT, E. (1985). Report on the Very Broad Band Seismograph. Harvard University, Cambridge, Massachusetts. 34 pp.
- STOIBER, R. E.; MALINCONICO, L. L.; WILLIAMS, S. N. (1983) *Use of correlation spectrometer at volcanoes*. En Forecasting volcanic events. Tazieff, H.; y Sabroux (editores). Elsevier Amsterdam, 409-424
- TORRENCE, C.; COMPO, G.P. (1998). *A practical Guide to Wavelet Analysis*. Bull. Amer. Meteor. Soc. **79**: 61-78.
- TRYGGVASON, E. (1989) *Ground deformation in Askja, Iceland: its source and possible relation to flow of the mantle plume*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 39 61-71
- TRYGGVASON, E. (1996). *Precision of ground deformation observations*. En The mitigation of Volcanic hazards. Barberi, F.; Casale, R.; Fantechi, R.(editores). European Commission DG XII. Bruselas. 365-372
- TOUTAIN, J. P.; BAUBRON, J. C.; BRONEC, J.; ALLARD, P.; BRIOLE, P.; MARTY, B.; MIELE, G.; TEDESCO, D.; LUONGO, G. (1992) *Continuous monitoring of distal gas emanations at Vulcano, Southern Italy*, Bull. Volcanol. 54: 147-155
- TRIMBLE NAVIGATION LTD. (1990) Trimble NAV03 navigation sensor board set. Specification and user's manual Trimble Navigation Ltd. CA 94086. USA. 88 pp
- USHER, M.J., BURCH, R.F.; GURALP, C. (1979). *Wide-band feedback seismometers*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 18, 38-50.
- UTHEIM, T.; HAVSKOV, J. (1998) The SEISLOG data acquisition system. Guide to installation, maintenance and daily operation of the system. Institute of Solid Earth Physics. University of Bergen. Noruega. 101 pp.
- VALENTIN, A.; MARTINI, M.; DIEZ GIL, J.L. (1989) *Geoquímica de fluidos en isla Decepción*. Actas del Tercer Simposio Español de Estudios Antárticos, Madrid. 195-199.
- VAN DER LAAT (1996) *Ground deformation methods and results*. En Scarpa, R.; Tilling, R. I., (editores) Monitoring and mitigation of volcano hazards. Springer-Verlag, Berlin. 147-168.
- VAN RUYMBEKE, M.; D'OREYE, N. (1991) *Design and construction of instruments adapted to volcanic zones*. Cahiers du Centre Européen de Geodynamique et de Séismologie. 4 57-70
- VAN RUYMBEKE, M. (1991) *New feedback electronics for LaCoste & Romberg gravimeters*. Geodynamical Instrumentation applied to volcanic areas. Cahiers de Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie Vol 4 333-338

- VAN RUYMBEKE, M. (1991) *Temperature measurements. Geodynamical Instrumentation applied to volcanic areas*. Cahiers de Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie 4: 205-214
- VERGNIOLLE, S. (1998). *Eruption dynamics from acoustic measurements: Piton de la Fournaise volcano (Reunion island)*. En Volcanic risk. The European laboratory volcanoes. Proceedings of the second workshop. Casale, R.; Fytikas, M.; Sigvaldasson, G.; Vougioukalakis, G. (editores). European Commission DG XII. Bruselas. 487-496
- VIEIRA, R.; VAN RUYMBEKE, M.; FERNANDEZ, J.; ARNOSO, J.; TORO, C. *The Lanzarote underground laboratory. Geodynamical Instrumentation applied to volcanic areas*. Cahiers de Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie Vol 4 71-86
- VOIGHT, B. (1988) *A method for prediction of volcanic eruptions*. Nature. 332 10: 125-130
- VOIGHT, B.; CORNELIUS, R. R. (1991) *Prospects for eruption prediction in near real-time*. Nature. 695-698
- WAGNER, W. Y HULL, C.J. (1971) Inorganic Titrimetric Analysis. Marcel Dekker, Inc. New York
- WHITTLESTONE, S.; SCHERY, S.D.; LI, Y. (1996) *Thoron and radon fluxes from the island of Hawaii*, J. Geophys Res., 101(D9), 14.787-14.794.
- WILLMORE, P.L. (1950). *The theory and design of two types of portable seismograph*. Geophys. Sup. Monthly Notices of the R.A.S. 6, 129-137.
- WILLMORE, P.L. (1961). *Some properties of heavily damped electromagnetic seismographs*. Geophysical Journal of the R.A.S. 4, 389-404.
- WYLLIE, C.R. (1976). Matemáticas superiores para ingeniería. Mc. Graw Hill, Madrid.
- YAMASHITA, K. (1993) *Nivelación de montaje único para vigilar el desplazamiento vertical (inclinación) en los volcanes de los Cascades*. En Vigilando volcanes: técnicas y estrategias empleadas por el personal del Observatorio Volcanológico Cascades 1980-90. Ewert J. y Swanson (editores). U.S. Geological Survey Bulletin 1966. Cascades Volcano Observatory 5400 MacArthur Blvd. Vancouver 98661 U.S.A. 163-170
- YOKOYAMA, I.; TILLING, R.; SCARPA R. (1984) International mobile early-warning systems for volcanic eruptions and related seismic activities. UNESCO. Paris. 102 pp.
- ZAKS, R. (1981) From Chips to System, Sybex, California, U.S.A. 414 pp.
- ZIMMER, M.; ERZINGER, J. (1998). *Geochemical monitoring on Merapi Volcano, Indonesia*. Deutsche Geophysikalische Gesellschaft. 89-92
- ZIMMER, M.; ERZINGER, J.; SULISTIYO, Y. (2000). *Continuous chromatographic gas measurements on Merapi Volcano, Indonesia*. Deutsche Geophysikalische Gesellschaft. 87-91
- ZLOTNICKI, J (1996) *Geomagnetic studies on volcanoes*. En The mitigation of Volcanic hazards. Barberi, F.; Casale, R.; Fantechi, R.(editores). European Commission DG XII. Bruselas. 311-340

## DIRECCIONES ÚTILES EN INTERNET

Esta relación no es exhaustiva, pues solo se han incluido aquellas direcciones directamente relacionadas con las aplicaciones descritas en este libro.

<http://farnell.com> distribución de componentes electrónicos

<http://rs-components.com> distribución de componentes electrónicos

<http://www.vaisala.com> Vaisala, fabricante de muchos tipos de sensores para meteorología y gases.

<http://www.hamamatsu.com> Hamamatsu, fabricante de sensores piro-eléctricos para la medida del CO<sub>2</sub>. Diodos para la detección de radón.

<http://www.aw-el.com> Aware Electronics Corp, detectores para la medida del radón con amplia información en control ambiental.

<http://www.captteur.co.uk> Capteur Sensor, sensores de estado sólido para diversos gases como SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HCl.

<http://www.figarosensor.com> Sensores de gases de estado sólido para diversos gases y sensores híbridos para CO<sub>2</sub>.

<http://citytech.com> Sensores electroquímicos para gases como el SO<sub>2</sub>.

<http://telaire.com> Telaire fabricante de sensores y medidores infrarrojos de CO<sub>2</sub>

<http://geomechanics.com> diversos tipos de inclinómetros que pueden utilizarse en vigilancia de volcanes.

<http://www.geospace.com> Geo-Space fabricante de geófonos, especialmente recomendable el sensor GS-11D de 4.5 Hz.

<http://www.burr-brown.com> Burr-Brown fabricante de circuitos integrados, especialmente conversores ADC delta-sigma como el ADS1210.

<http://www.analog.com> Analog Devices, conversores analógico digitales de tecnología delta sigma como AD7710 y AD7731, amplificadores operacionales de bajo ruido, etc.

<http://trimble.com> sistemas GPS de todas las categorías. Especialmente recomendado el módulo receptor LASSEN II para su utilización en sistemas de registro sísmico.

<http://www.marconi.ca/> CMC Marconi Canada, Fabricante de receptores GPS de bajo coste con salida de fase L1.

<http://www.maxim-ic.com> MAXIM, fabricante de circuitos integrados: conversores analógico digitales, interfaces RS232 y RS485, fuentes de alimentación, etc.

<http://www.semiconductor.agilent.com> División de componentes electrónicos de Hewlett Packard, opto-aisladores, etc.

[www.picotech.com](http://www.picotech.com) PICO conversores analógico digitales para PC de bajo coste, sistemas de adquisición de datos, osciloscopios digitales. Aplicaciones prácticas para didáctica de las ciencias experimentales.

<http://www.tamug.tamu.edu/lab/Links.htm> numerosas referencias de aplicaciones y sistemas de telemetría.

<http://www.radiometrix.co.uk> transmisores VHF y UHF de muy baja potencia, ideales para enlaces digitales a corta distancia.

<http://www.rfneulink.com/> RF NEULINK fabricante de radio módem y spread spectrum. Posee un amplio catálogo de radioenlaces.

<http://www.rfsolutions.co.uk> enlaces radio de baja potencia AM y FM, emuladores de microcontroladores.

<http://www.freewave.com> FreeWave fabricante de enlaces spread spectrum de alta capacidad.

<http://www.iowegian.com/scopefir.htm> Iowegian International Corporation, Programa para el cálculo de coeficientes de filtros FIR y tratamiento digital de señales DSP.

<http://www.microchip.com> Microchip Technology, Inc. Fabricante de microcontroladores como el PIC16F84 y memorias EEPROM, sistemas de desarrollo y emuladores para estas familias. Programas para el desarrollo de aplicaciones con microcontroladores y cálculo de filtros pasa bajos. Etc.

<http://www.hauppauge.co> Hauppauge Computer Works, fabricante de adaptadores de cámaras de vídeo a PC. Programas de captura de imagen y detectores de movimiento.

<http://www.borland.com> BORLAND INPRISE lenguajes de programación para DOS, Windows y Linux. Es especialmente interesante el entorno de desarrollo visual en C++ BUILDER 5 que permite realizar en poco tiempo aplicaciones muy eficaces de adquisición de datos.

<http://www.abaecker.com> ABAKUS componentes visuales para Borland BUILDER 5 especialmente indicados para el desarrollo de instrumentación virtual.

<http://varian-software.com> VARIAN componentes para Borland BUILDER 5 especialmente indicados para el control del puerto serie RS232

<http://www.spis.co.nz/compress.htm> componentes para gestionar ficheros comprimidos en Borland BUILDER 5. Utiliza entre otros el algoritmo LZW: Lempel-Ziv-Welch que permite alcanzar tasa de compresión superior al 75% en ficheros de información sísmica.

<http://www.orbicom.com> telefonía y enlaces de telemetría de bajo coste por satélite

<http://psion.com> PSION fabricante de pequeños computadores de bajo consumo con el sistema operativo EPOC32. Ideales para trabajar como sistemas autónomos de adquisición de datos.

<http://symbian.com> SYMBIAN creador del sistema operativo EPOC32. Proporciona las herramientas para el desarrollo de aplicaciones para este sistema operativo.

<http://cenapred.unam.mx> página del Centro Nacional de Prevención de Desastres de México, con importante información sobre el monitoreo instrumental del volcán Popocatepetl.

<http://web.poseidon.nti.it/sorvis> POSEIDON, programa para el seguimiento de la actividad volcánica en Sicilia. Cámaras en tiempo real en los volcanes Etna, Vulcano y Stromboli.

<http://www.sciam.com/2000/0100issue/0100amsci.html> interesante realización de un sismómetro de banda ancha que permite registrar las mareas gravimétricas. También se encuentra en <http://www.eden.infohwy.com/~rcbaker/>

<http://www.infiltec.com/seismo/> referencias sobre sismómetros de fácil construcción.

<http://laipac.com/msg4.htm> LAIPAC TECHNOLOGY INC receptores GPS de bajo coste.

<http://www.ni.com/mstudio> National Instruments software para el desarrollo de instrumentación virtual (LABVIEW, C++, Visual Basic, etc.)

<http://www.unavco.ucar.edu> proyecto de una red GPS para el seguimiento de la actividad volcánica utilizando receptores de una sola frecuencia L1.

[http://folkworm.ceri.memphis.edu/ew/schema\\_doc/ewv5design.html](http://folkworm.ceri.memphis.edu/ew/schema_doc/ewv5design.html) página de referencia del paquete informático para el tratamiento de señales sísmicas Earthworm V5

# PRÁCTICAS DE INSTRUMENTACIÓN

## Introducción

En este apéndice se enumeran una serie de ejercicios prácticos que corresponden a la parte práctica de un curso de instrumentación en volcanología

## Herramientas de software

Se requieren una serie de paquetes de software para poder realizar fácilmente los ejercicios propuestos en este apéndice.

- Un paquete de diseño y simulación de circuitos electrónicos como puede ser el MICRO-CAP 6 de MICRO-SPECTRUM Software o el ORCAD LITE. En sus versiones de evaluación son suficientes para el análisis de los circuitos electrónicos básicos que se proponen.
- Un paquete para el diseño de filtros como el SCOPEFIR de IOWEGIAN o FILTERLAB de MICROCHIP.
- Un hoja de cálculo matemático como puede ser el MATCAD o el MATLAB para el estudio de las funciones de transferencia. También puede utilizarse DADISP DSP. Es suficiente con utilizar las versiones reducidas de educación.
- Un compilador de C para el sistema operativo elegido. Para el entorno Windows, el mas sencillo es el BORLAND BUILDER C.
- Un paquete para el diseño de aplicaciones para la familia de microcontroladores elegida. Para el PIC16F84 es el MPLAM de MICROCHIP.

## Instrumentación electrónica

Estos elementos pueden auto-construirse, pero es conveniente disponer de ellos para poder ponerlos en operación fácilmente. También es necesario adquirir una cierta habilidad en el manejo del osciloscopio.

- Herramientas convencionales, como destornilladores, corta-hilos, soldador (punta fina) etc.
- Polímetro digital con escalas que alcancen 200 mV en corriente continua y medidas en corriente alterna y resistencias.
- Es conveniente disponer de un generador de baja frecuencia que debe poder generar señales de 1 Hz.
- Se requiere un osciloscopio de baja frecuencia. Es suficiente que supere 10 KHz. Cualquier osciloscopio tradicional supera este ancho de banda. También puede utilizarse un osciloscopio basado en un computador como la familia de PICO TECHNOLOGY.
- Fuente de alimentación de 12 V en corriente continua.

- Todos los componentes electrónicos utilizados en los ejercicios se pueden conseguir en los catálogos de las principales distribuidoras internacionales como FARNELL o RS- COMPONENTS

### **Partes mecánicas**

Se ha procurado simplificar los diseños de forma que puedan construirse fácilmente con un juego de herramientas mínimo.

### **Realizaciones prácticas**

Mediante un paquete de diseño y simulación estudiar el comportamiento de los siguientes circuitos:

- Amplificador operacional
- Amplificador inversor y no inversor. Estudio de la impedancia de entrada.
- Amplificador diferencial
- Circuito integrador
- Circuito derivador
- Rectificador de media honda y de onda completa
- Amplificador con impedancia de entrada negativa
- Filtro pasa-bajos de 10 Hz
- Filtro pasa-altos de 1 Hz
- Filtro pasa-banda de 1 KHz
- Filtros pasa-bajos de múltiples polos (2,4,8)
- Filtro anti-alias para muestreo a 50 Hz y 16 bits de resolución
- Preamplificador para expansión de la respuesta de un geófono de 4.5 Hz.

NOTA todos estos circuitos deben diseñarse para que operen satisfactoriamente a baja frecuencia, por ejemplo por debajo de 100 Hz.

Realización practica de los circuitos anteriores utilizando amplificadores operacionales

- Diseño de los circuitos prácticos
- Realización práctica
- Comprobación de su funcionamiento y comparación con el diseño teórico. Para ello es imprescindible un buen manejo del osciloscopio
- Diseño de los circuitos impresos correspondientes

Aplicaciones con microprogramadores

- Utilizar un microcontrolador para encender y apagar un LED mediante apertura y cierre de un contacto. Se recomienda trabajar con un PIC16F84
- Construir un semáforo con un microcontrolador. Encender periódicamente un LED rojo, amarillo y verde, haciendo que el led amarillo parpadee.
- Implementar una función de transmisión serie en un microcontrolador. Hacer que transmita continuamente una secuencia de caracteres ASCII.
- Transmisión serie a 9600 baudios de la trama de caracteres binarios AA 01 xx yy 3C donde el par xx yy es un contador que se incrementa después de cada transmisión (0000, 0001, 0002.....).

- Desarrollo del software para el computador. Esta aplicación debe reconocer la secuencia anterior, extraer la información (bytes xx yy) y transferirla a un fichero.
- Completar la aplicación anterior añadiendo una salida gráfica.

#### Sistemas de conversión analógico digital

- Diseño de un conversor analógico digital de 12 bits.
- Estudio de las hojas de características del conversor
- Diseño del circuito de control
- Desarrollo del software para el microcontrolador correspondiente
- Montaje del circuito
- Comprobación del correcto funcionamiento mediante una fuente de tensión variable de 0 a 5V y un oscilador de baja frecuencia.
- Diseño de un conversor analógico digital de 12 bits y 8 canales de entrada (MAX186).
- Diseño de un conversor analógico digital de 24 bits de resolución operando a 16 bits (AD7710, AD7731, ADS1210).

#### Transmisión de datos

- Desarrollar una telemetría digital por cable utilizando enlaces RS485
- Desarrollar una telemetría digital por cable utilizando un sistema de módem.
- Desarrollar un módem de 4800 baudios y construir un enlace radio mediante radio-enlaces convencionales.
- Realizar transferencias de datos mediante comunicación telefónica entre computadores.
- Desarrollar una aplicación para el envío automático de datos a través de INTERNET. Para pequeños volúmenes de datos puede utilizarse un servicio de mensajería o el correo electrónico.

#### Instrumentos

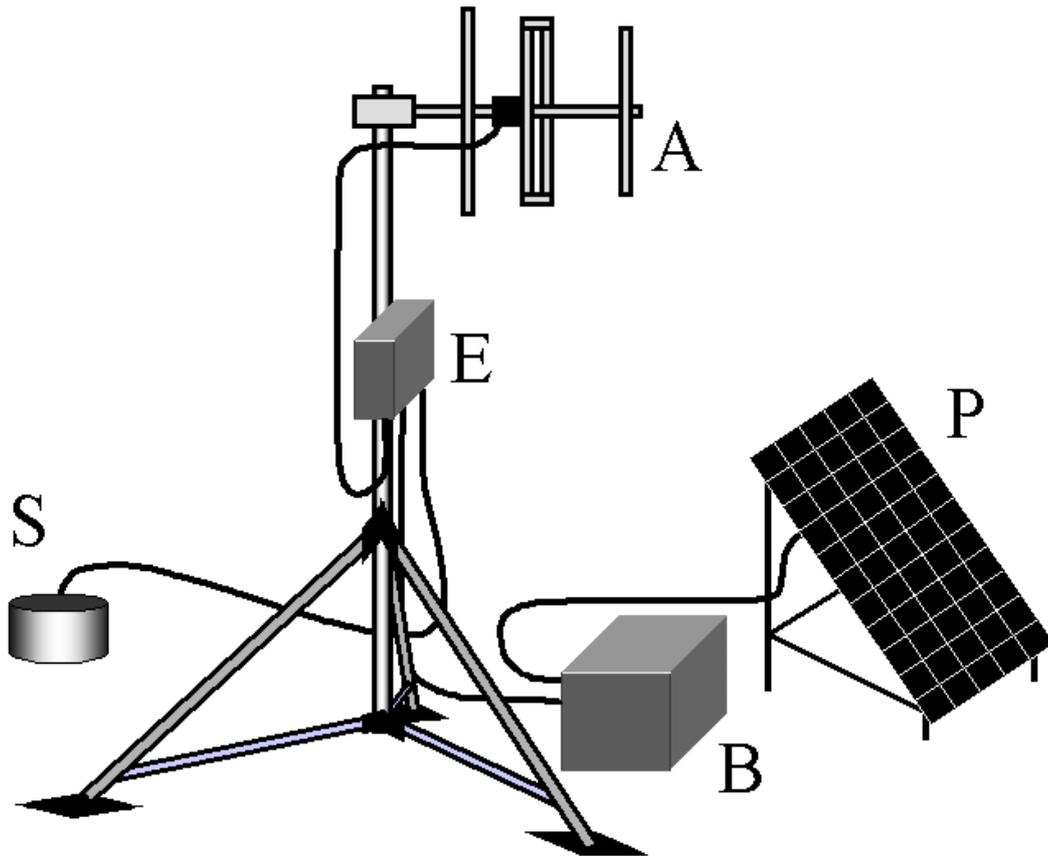
- Diseño y construcción de una estación sísmica con registro digital utilizando los elementos anteriores.
- Diseño y construcción de un inclinómetro de péndulo vertical y ensayar diversos tipos de detectores (capacidad, reluctancia variable, óptico).
- Diseño y construcción de un sensor sísmico (horizontal y vertical) y ensayar diversos tipos de sensores (inducción, reluctancia variable, capacidad, óptico). Expandir la respuesta aplicando una realimentación negativa.
- Diseño y construcción de termómetros de resistencia, semiconductor y termopar.
- Diseño y construcción de un termómetro con un sensor piroeléctrico del tipo usado para alarmas de intrusos. Utilizar un modulador mecánico.
- Diseño y construcción de un sistema de almacenamiento de datos utilizando un conversor analógico digital, un microcontrolador y una memoria RAM estática de gran capacidad.

#### Gases

- Realización de una trampa alcalina para coleccionar gases volcánicos.
- Diseño y construcción de un medidor de pH.
- Determinación del contenido en CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> mediante una trampa alcalina.
- Diseño de un medidor de CO<sub>2</sub> utilizando un detector piroeléctrico.

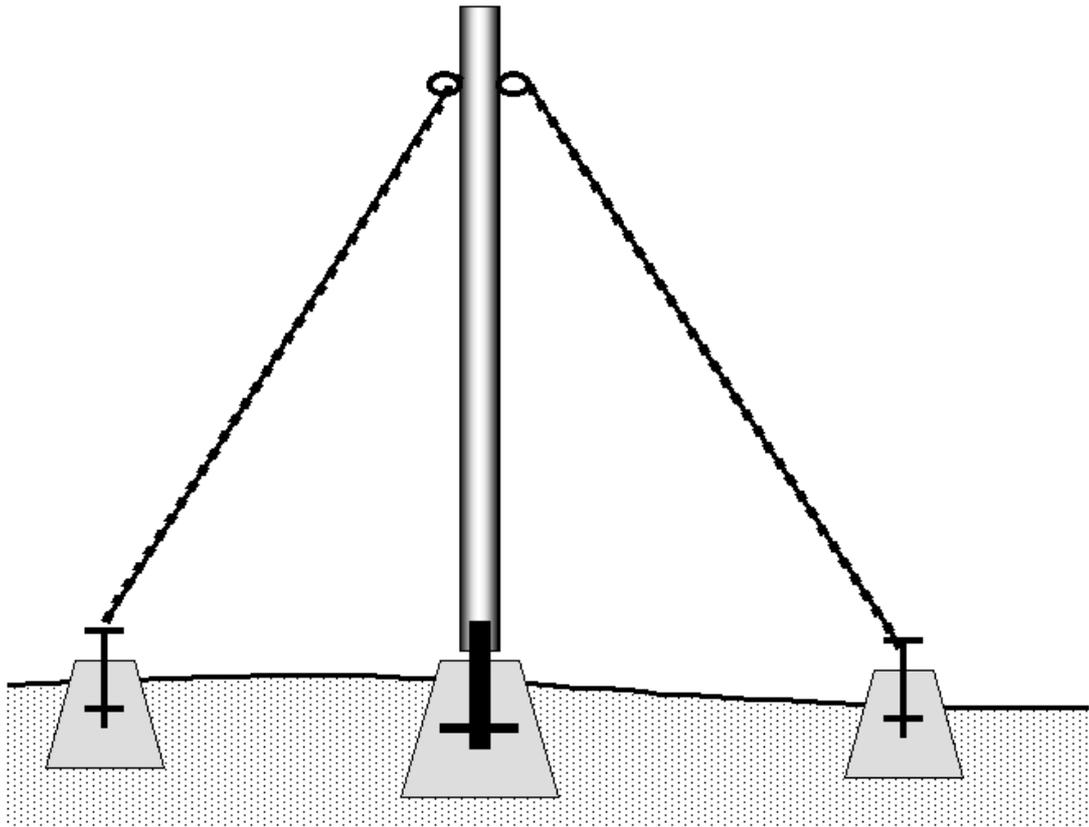
## MÁSTILES Y SOPORTES

La colocación de una antena en un volcán activo no es una labor sencilla, pues en general deberemos instalarla en zonas donde no se cuenta con ninguna infraestructura, sobre terrenos que no siempre son suficientemente consistentes para poder en ellos realizar sujeciones firmes. Además, en caso de crisis tampoco se dispone de tiempo para realizar montajes complejos. Por este motivo incluimos aquí algunas ideas que nos van a simplificar esta labor.



**Figura A 2-1.** Soporte prefabricado tipo trípode. En el terreno se fija con clavos o acumulando piedras en cada pata.

Para instalaciones de emergencia la mejor solución es disponer de una serie de trípodes realizados en tubo de hierro galvanizado. Es preferible realizarlos soldando las distintas piezas, aunque esto suponga un engorro para el transporte. Si se opta por la solución de utilizar tornillos, hay que usar siempre tornillos inoxidables. Sobre el mismo soporte se pueden montar los distintos componentes, como el transmisor y la electrónica. La batería es preferible apoyarla directamente en el suelo. El panel solar puede montarse sobre el trípode, pero hay que tener presente que ofrece mucha resistencia al viento y ello facilita la desorientación de la antena o incluso la caída de todo el montaje.



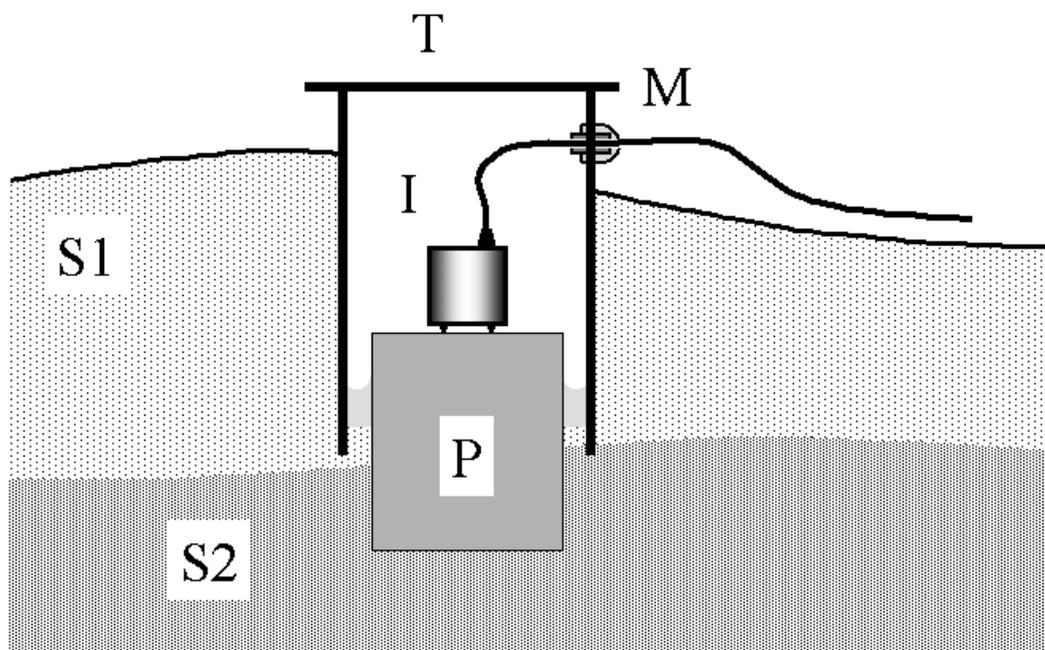
**Figura A 2-2.** Montaje de un mástil en un terreno blando utilizando pilares prefabricados.

En instalaciones fijas es preferible utilizar un mástil, pues permite mayores alturas. Existen realizaciones comerciales, pero suponen un gasto importante, por ello lo mejor para alturas moderadas, menores de cinco metros, utilizar un tubo de hierro galvanizado, en el que se sueldan unas orejas para poder fijar los cables (vientos) de sujeción. En terrenos duros es posible fijar a las rocas clavos donde amarrar los vientos, sin embargo en terrenos blandos esto no es posible. La mejor solución es utilizar una serie de pilares construidos en hormigón (concreto) . Estos pilares pueden prepararse antes, y simplemente enterrarlos en el emplazamiento. De esta forma se evita tener que esperar a que el cemento fragüe. En los pilares laterales hay que colocar un hierro que permita fijar el viento. Este hierro debe llevar una cruceta en cada extremo para evitar que se mueva o se escape el viento. El pilar central debe llevar un trozo de tubo que sirva para el centrado del mástil.

En todos los casos no debe olvidarse instalar una buena toma de tierra y conectar a ella con un conductor de cobre de suficiente diámetro todos los elementos metálicos del montaje.

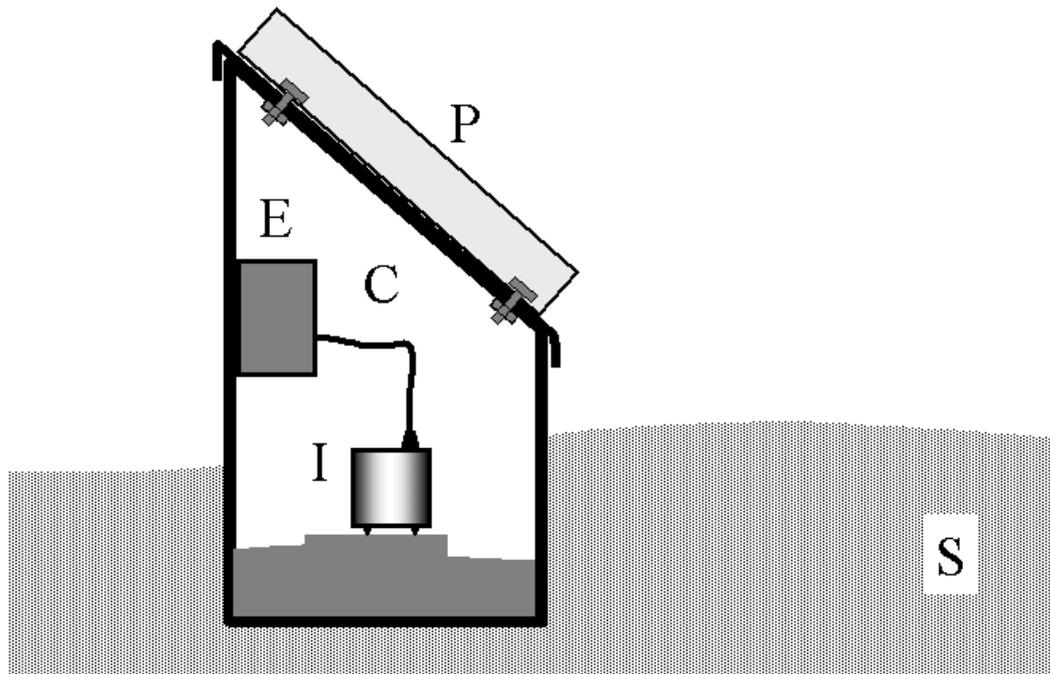
## CASSETAS PARA INSTRUMENTOS

La instalación de un instrumento en un volcán activo no es sencilla, especialmente por la abundancia de suelos blandos, como pueden ser todas las zonas cubiertas por piroclastos. En estos casos es necesario excavar un pequeño pozo y tratando de alcanzar un nivel más consolidado donde emplazar el instrumento. Es importante evitar la entrada de agua en el pozo, tanto por la parte superior como por filtración desde los niveles más profundos. Una vez excavado el pozo, se debe entubar, bien con un tubo de plástico o construyendo una pequeña obra de ladrillo. Después hay que construir un pilar de hormigón (concreto), procurando que quede bien asentado en los niveles más consolidados. Este pilar no debe tocar las paredes del tubo, impermeabilizando la base mediante una resina, de esta forma evitamos que el tubo se comporte como una guía de ondas desde la superficie. La tapa debe cerrar impidiendo la entrada de agua. Los cables se sacan mediante un pasamuros.



**Figura A 3-1.** Esquema de un pozo para instrumentos. S1 suelo blando; S2 suelo consolidado (no siempre alcanzable en la práctica); P pilar; T entubado; M pasa-muros para los cables; I instrumento.

En suelos más duros, la solución mejor es construir una pequeña caseta donde colocar los instrumentos. Esta caseta debe estar a prueba de vandalismo, por lo que la mejor solución es hacer una caja metálica, bastante mayor de lo necesario de forma que en el terreno se pueda rellenar parcialmente de hormigón, con lo cual su peso sobrepasa fácilmente 200 Kg, de esta forma es casi imposible que puedan llevársela. Además, los cierres deben ser también antivandálicos. La caja se puede hacer con el techo inclinado, de forma que sobre él pueda fijarse el panel solar. De esta forma, los tornillos de fijación quedan al interior de la caja y no es posible sacarlos desde el exterior.



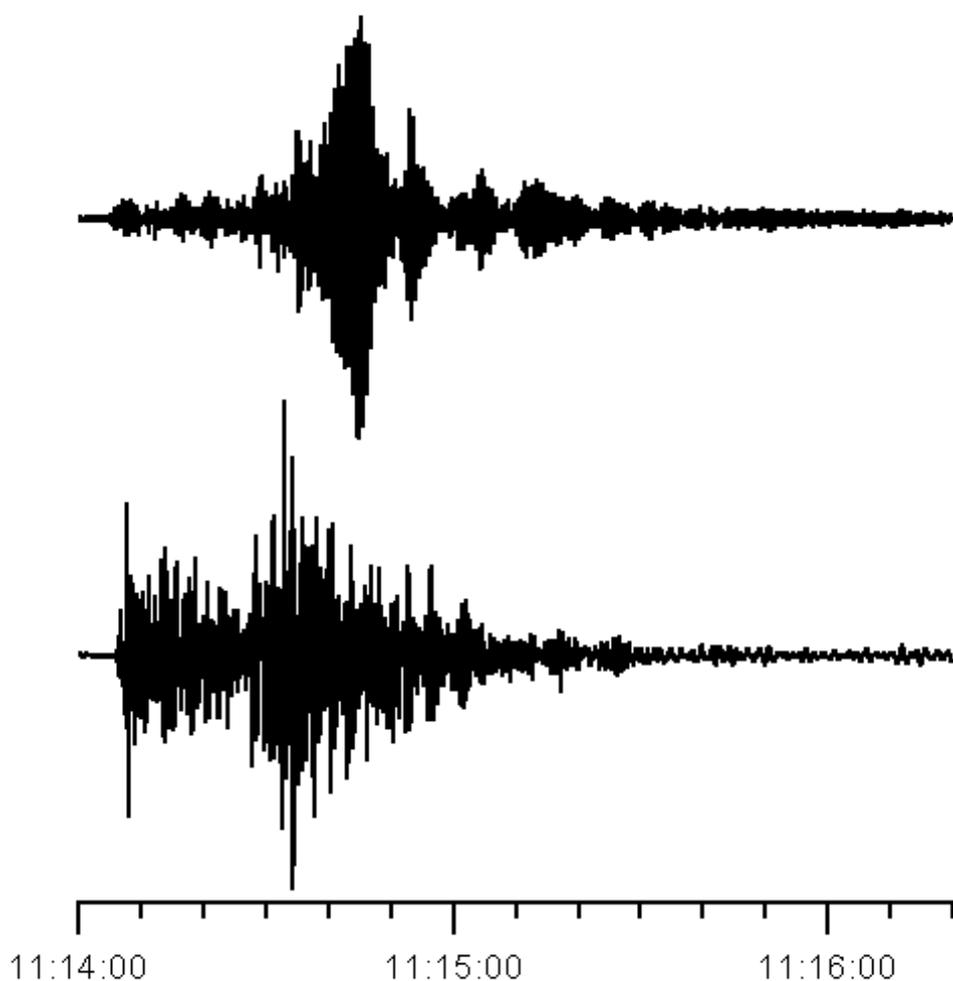
**Figura A 3-2.** En suelos duros lo mejor es situar los instrumentos dentro de una caja impermeable, realizada en hierro, la caja se rellena parcialmente con hormigón, que además de unirla al suelo impide que puedan llevarse. S suelo, C caja; I instrumento; P panel solar, E electrónica.

Si hay que adoptar precauciones contra el agua, muchas más hay que tomar en zonas donde sean frecuentes las nevadas. En estos casos, además de dotar a las cajas de techos inclinados, es conveniente disponer los elementos electrónicos a suficiente altura para que no sean cubiertos por la nieve o bien realizar la construcción de la caja con suficiente rigidez para que resista el peso de la nieve e impida la entrada del agua.

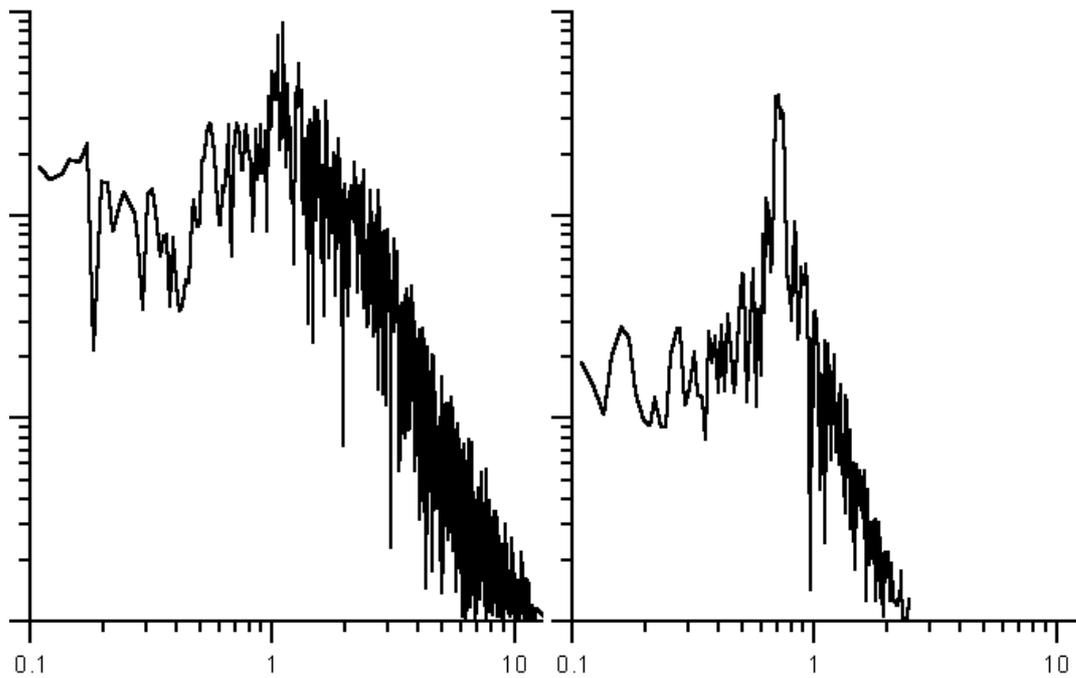
Es conveniente realizar antes de la construcción de la caseta una serie de pruebas dirigidas a evaluar las características del emplazamiento. Entre los factores que condicionan el emplazamiento está la calidad intrínseca del sitio desde el punto de vista observacional, pero también hay que tener presente las posibilidades de la telemetría, el emplazamiento del panel solar en zona libre de sombras. Finalmente, si la zona es muy transitada, la probabilidad de sufrir un acto vandálico aumenta, especialmente son muy tentadores los paneles solares.

## AMPLIFICACIÓN ANÓMALA: EFECTO SUELO

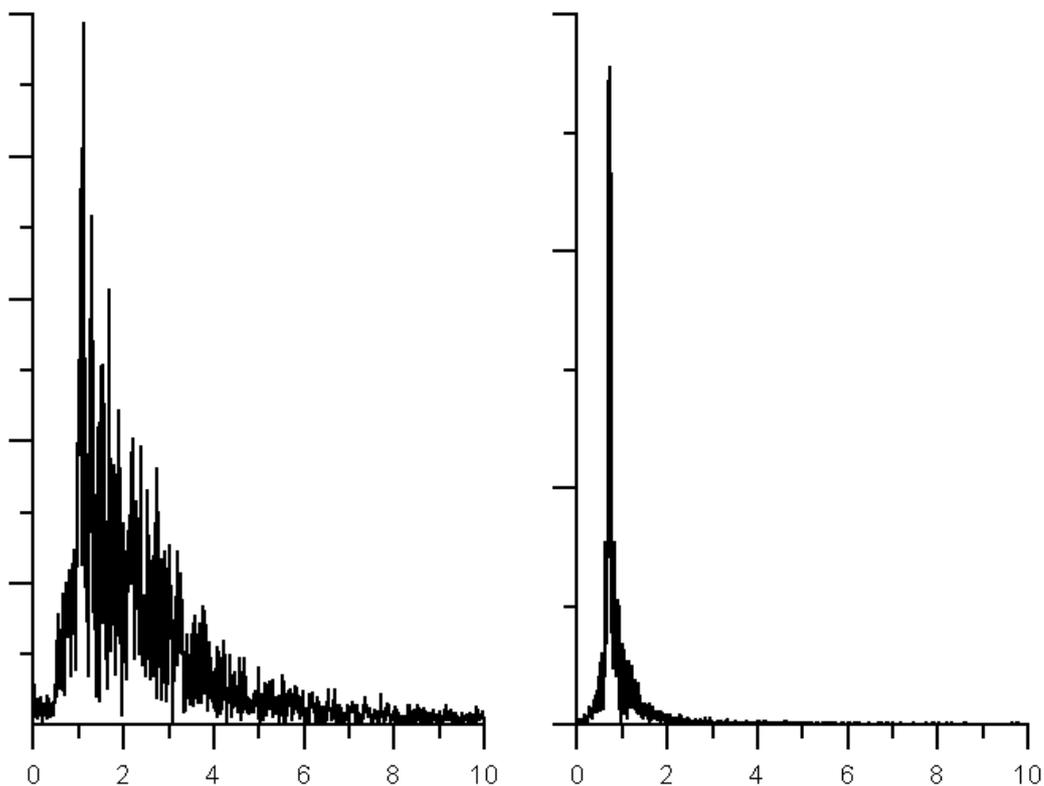
Los suelos blandos presentan la característica de amplificar unas frecuencias muy definidas frente al resto del espectro sísmico. En los volcanes activos, los sucesivos apilamientos de coladas y piroclastos hacen que este fenómeno se presente con mucha frecuencia. Es muy importante tenerlo presente, pues puede ser que muchas señales que se atribuyan a temblores volcánicos no sean otra cosa que el efecto del suelo sobre señales de origen meteorológico o sismos lejanos. Este efecto puede ponerse fácilmente de manifiesto comparando los registros obtenidos por las estaciones situadas sobre el volcán con una estación de referencia situada en roca. El método de Nakamura permite mediante una estación de tres componentes determinar las amplificaciones relativas de distintas partes del espectro, sin más que dividir los espectros obtenidos en las componentes horizontales por el espectro de la componente vertical.



**Figura A 4-1.** Registro de un sismo tectónico regional obtenido en dos estaciones situadas en el volcán Llaima (Chile) separadas menos de 10 Km. Mientras que el registro inferior muestra un sismograma de aspecto normal, el registro superior es totalmente anómalo. Ambas estaciones utilizan la misma electrónica y están equipadas con un geófono L4-C. Cortesía Observatorio Volcanológico de los Andes del Sur Chile.



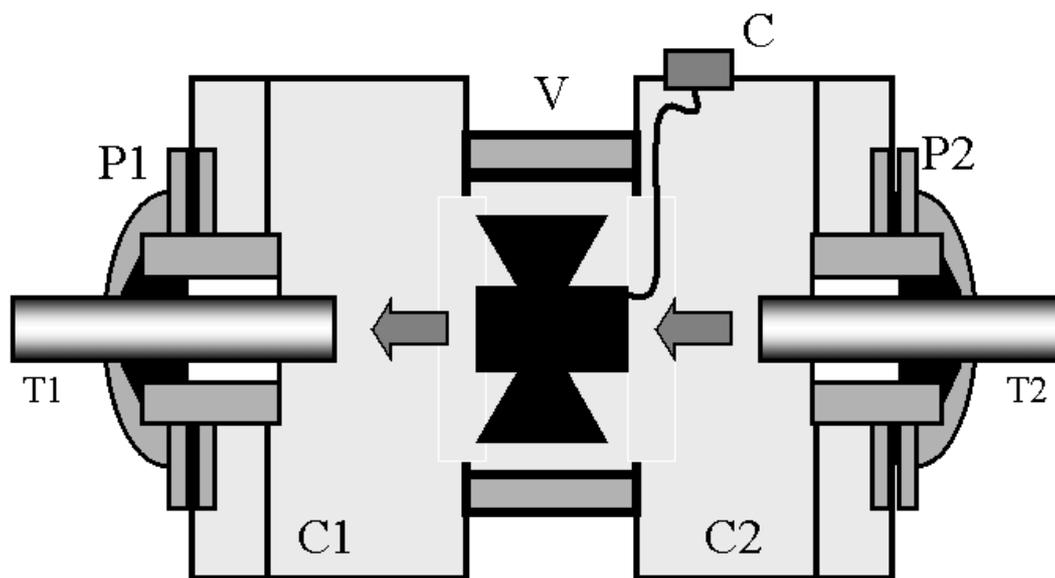
**Figura A 4-2.** Espectros en desplazamiento correspondientes a onda P de las señales de la figura anterior. Mientras el espectro de la derecha responde bastante bien al espectro teórico, el espectro de la izquierda muestra la amplificación anómala a la frecuencia de 0.8 Hz.



**Figura A 4-3.** Los mismos espectros en la representación habitual para el análisis de los temblores volcánicos: en velocidad y escalas lineales. Obsérvese el fuerte carácter monocromático del espectro de la izquierda.

## MINI BOMBA PARA PEQUEÑOS FLUJOS DE GAS

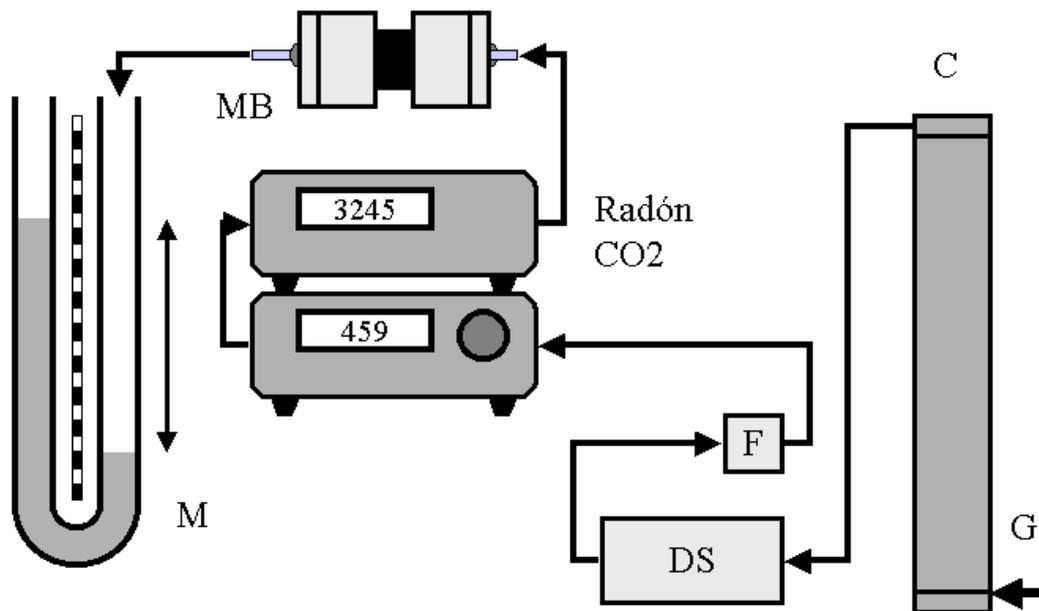
Para el análisis continuo de gases se requiere de una bomba que haga circular un pequeño flujo de gas. Esta bomba deberá poder operar en modo continuo durante mucho tiempo sin mantenimiento y ser de bajo consumo. No es fácil encontrar en el mercado este tipo de componente, y los modelos disponibles son difíciles de conseguir en pequeñas cantidades a un precio razonable. Una solución consiste en utilizar un pequeño ventilador del tipo utilizado para la refrigeración de los procesadores (CPU) en los computadores. Estos ventiladores, de muy bajo coste, están diseñados para operar continuamente y se alimentan con corriente continua a 5 V, aunque es posible conseguir modelos que funcionan a 12 V. Un montaje sencillo consiste en disponer el motor entre dos cajas que posean un cierre estanco. A cada una de estas cajas se le coloca un pasamuros para poder acoplar los tubos de entrada y salida de gas, a una de ellas se le coloca un pequeño conector estanco para alimentar el motor. En aquellos casos donde no se requiere canalizar el gas de salida se puede simplificar el montaje prescindiendo de la caja de salida. En sistemas que toman unas pocas muestras por día, se suele activar el motor unos minutos antes de iniciar el proceso de mediada. De esta forma se tiene la seguridad de haber renovado el gas que llena el dispositivo de medida. Aunque se puede disponer en cualquier punto del circuito del gas, en general se suele situar a la salida de toda la cadena analítica.



**Figura A 4-1.** Utilización de un pequeño ventilador para construir una mini-bomba para gases. C1 y C2 son dos pequeñas cajas estancas. P1 y P2 dos pasamuros para permitir la conexión de los tubos T1 y T2. V es el ventilador y C un conector miniatura.

Es conveniente disponer siempre un sistema de desecado del gas y un filtro antes de la entrada a la bomba y al sistema analítico. Hay que recordar que el agua es el mayor enemigo de la electrónica, y que es el componente más abundante del gas volcánico. Aunque aparentemente se esté muestreando un gas “seco” no es de extrañar que en poco tiempo aparezcan condensaciones que empezarán por afectar la exactitud de las medidas

y terminarán por destruir el sistema. La efectividad de la bomba se puede evaluar midiendo la presión que se obtiene a su salida mediante un pequeño manómetro diferencial de agua. Si se desea conocer el flujo que circula por el sistema, lo mejor es disponer un sensor de presión diferencial sobre una célula de Venturi. Existen en el mercado dispositivos de este tipo comerciales para una amplia gama de valores de flujo. Este tipo de sistemas requiere mucho más mantenimiento que un instrumento para el registro sísmico o la medida de la deformación, pues periódicamente hay que sustituir el desecante y el filtro, pues en caso contrario pierden toda su eficacia.



**Figura A 4-2.** Ejemplo de utilización de la mini-bomba: se trata de un dispositivo para la medida simultánea de CO<sub>2</sub> y Radón. El gas G procedente de la fumarola o dispositivo de muestreo pasa por una columna de refrigeración C que condensa la mayor parte del agua que pueda contener el gas. A la salida se encuentra un desecador DS y un micro-filtro F. El gas ya seco y libre de partículas pasa al dispositivo analítico (Radón y CO<sub>2</sub>). La mini-bomba se encarga de hacer circular lentamente el gas por el dispositivo. Un simple manómetro de agua M permite conocer si el sistema funciona correctamente. Lógicamente, hay que desconectar el manómetro para que el gas pueda circular.