

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.

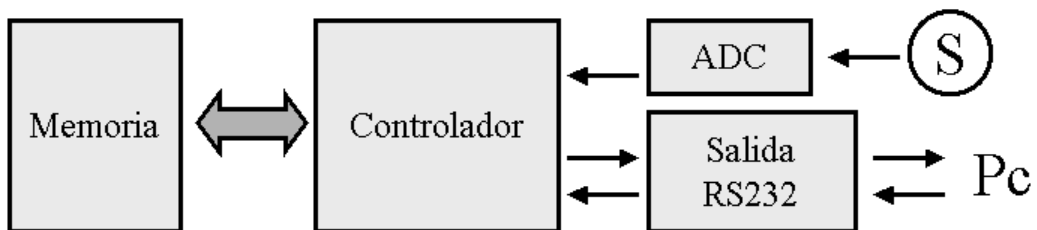


Figura 5-1. Diagrama bloque de un sistema de almacenamiento de datos. Consta de una memoria, un controlador, un conversor analógico digital para la entrada de los datos y una interfase para el computador.

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.

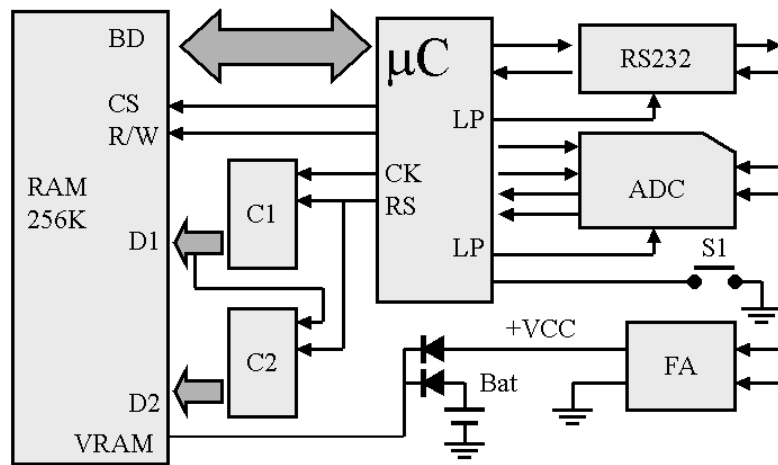


Figura 5-2. Sistema de adquisición de datos que utiliza una memoria RAM estática de gran capacidad. La dirección de escritura / lectura se obtiene mediante un contador C1 y C2. De esta forma se puede utilizar un pequeño microcontrolador.

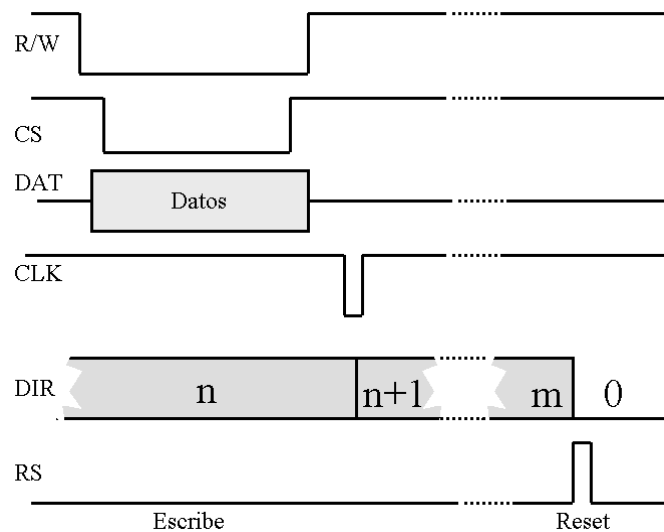


Figura 5-3. Señales para el control de una memoria RAM. RW permite seleccionar el modo escritura o lectura de una celda. La bajada de la línea CS ejecuta la operación de escritura (RW = 0) o de lectura (RW = 1). En el caso de una operación de escritura los datos deben estar disponibles en la puerta de 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.

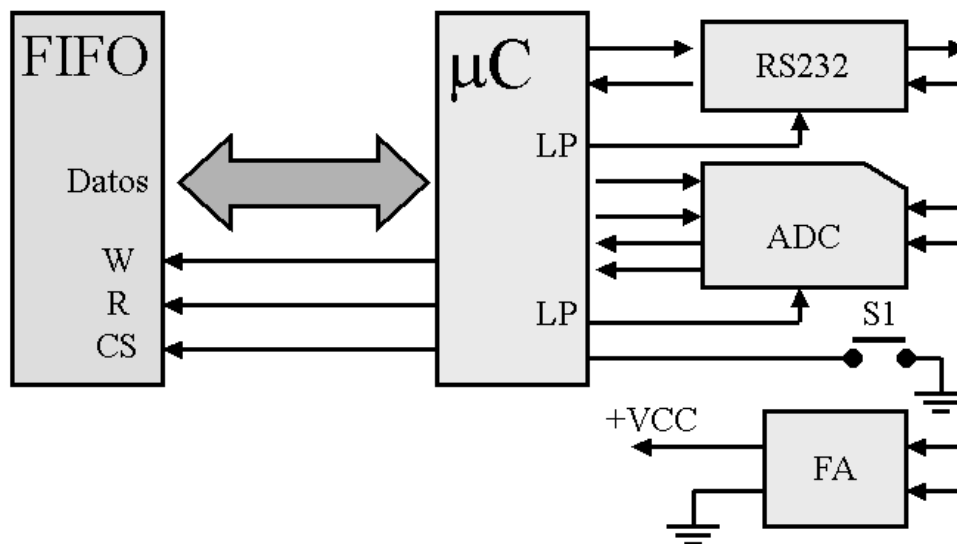


Figura 5-4. Utilización de una memoria FIFO para la construcción de un pequeño sistema de adquisición de datos.

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.

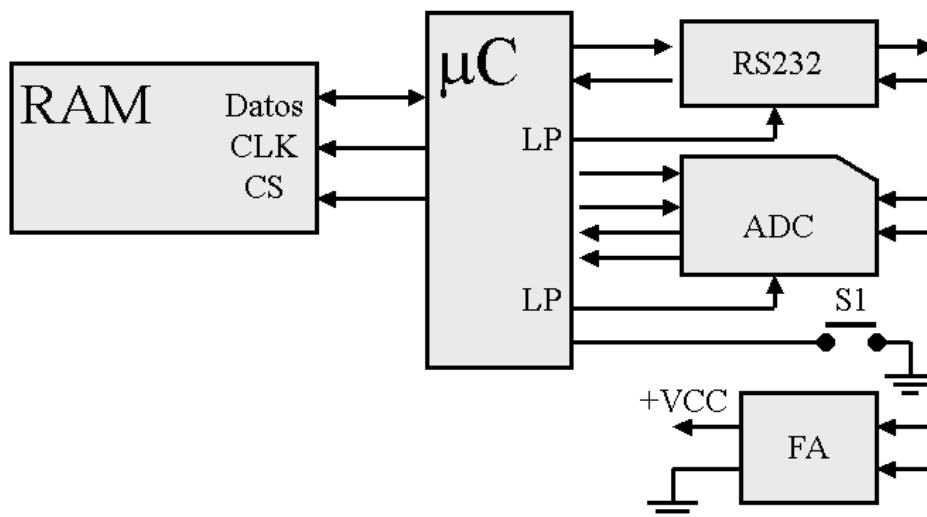


Figura 5-5. Sistema de adquisición con una memoria RAM de acceso serie. Al sólo requerir dos o tres líneas de control el sistema es muy sencillo.

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.

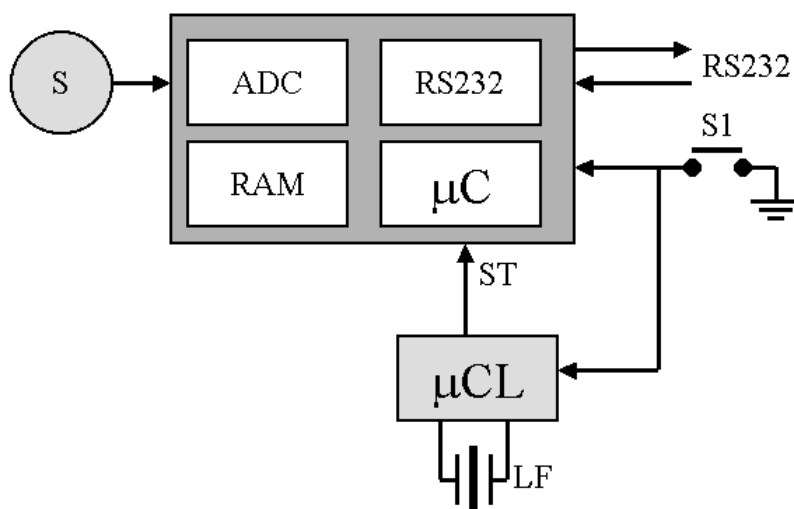


Figura 5-6. Utilización de un segundo microcontrolador operando a muy baja frecuencia para iniciar los ciclos de medida. De este modo, el microcontrolador principal puede ponerse en modo de espera y disminuir el consumo.

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.

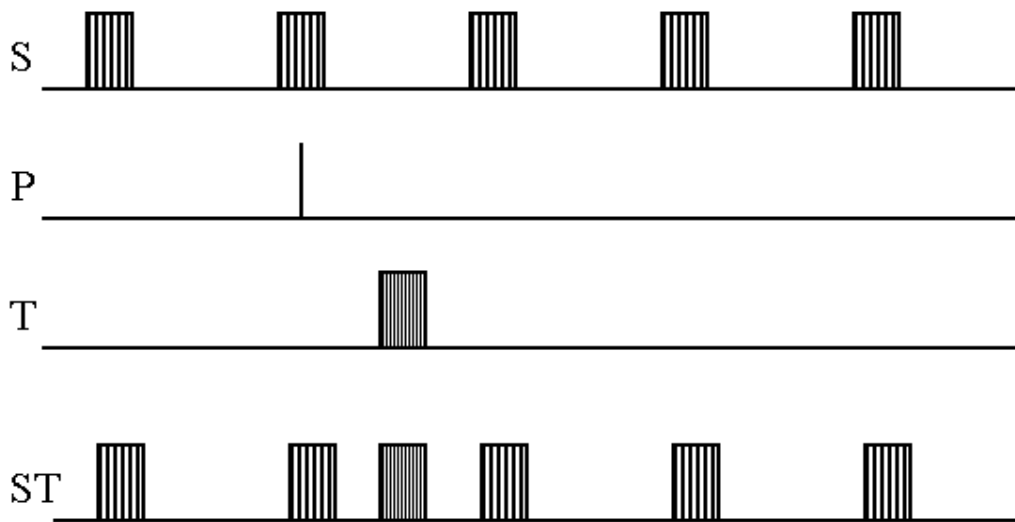


Figura 5-7. Intercalación de la información horaria (T) en la trama de datos sísmicos (S). Al recibirse el pulso de segundo (P) se espera que se termine de transmitir el dato sísmico y seguidamente se transmite el código horario. La velocidad de transmisión debe ser suficientemente grande para que no 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.

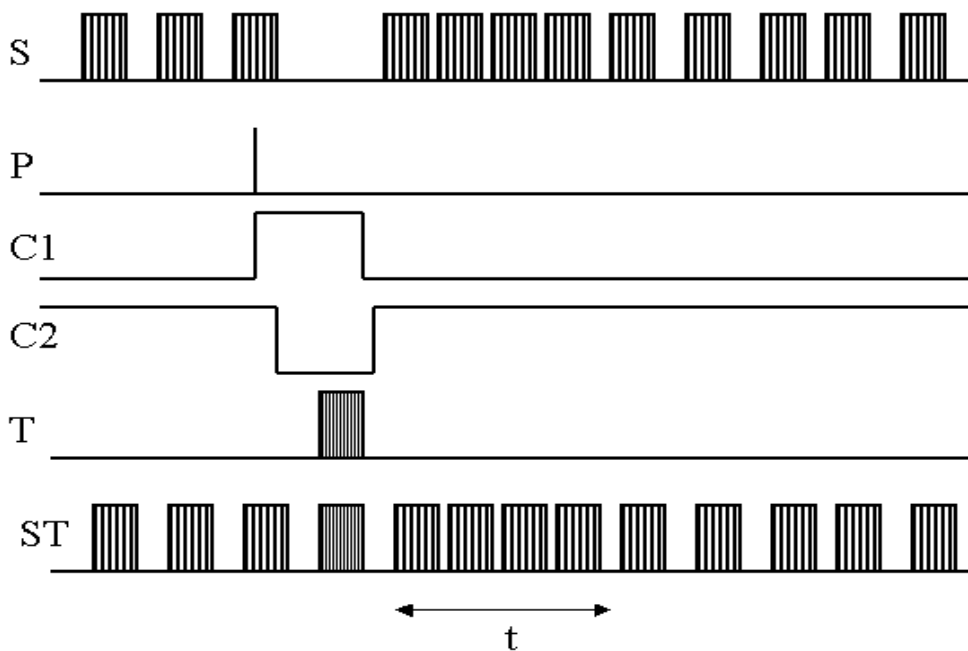


Figura 5-8. Cuando se integra el receptor GPS en el propio sistema de adquisición es posible transmitir el código de tiempo dentro de la misma secuencia sísmica, simplemente interrumpiendo la transmisión de datos sísmicos (S) en coincidencia con el pulso de segundo (P) y añadir el mensaje de tiempo (T). 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.

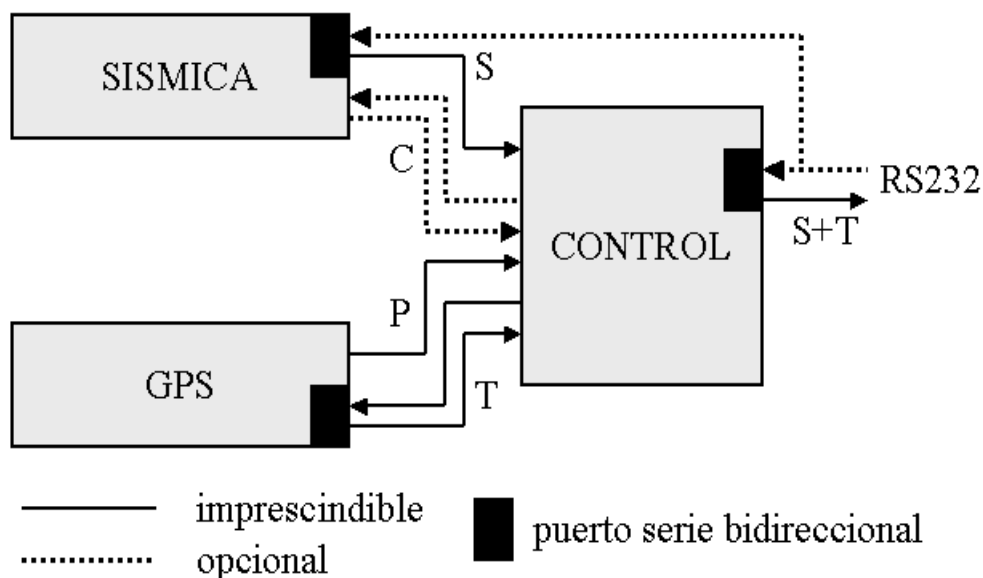


Figura 5-9. Un sistema de control recibe la información del receptor GPS y del sistema sísmico. La conexión con el receptor GPS es bidireccional (T) y además recibe el pulso de segundo (P) que provoca una interrupción en el controlador. La conexión con el sistema sísmico puede ser unidireccional (S) 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.

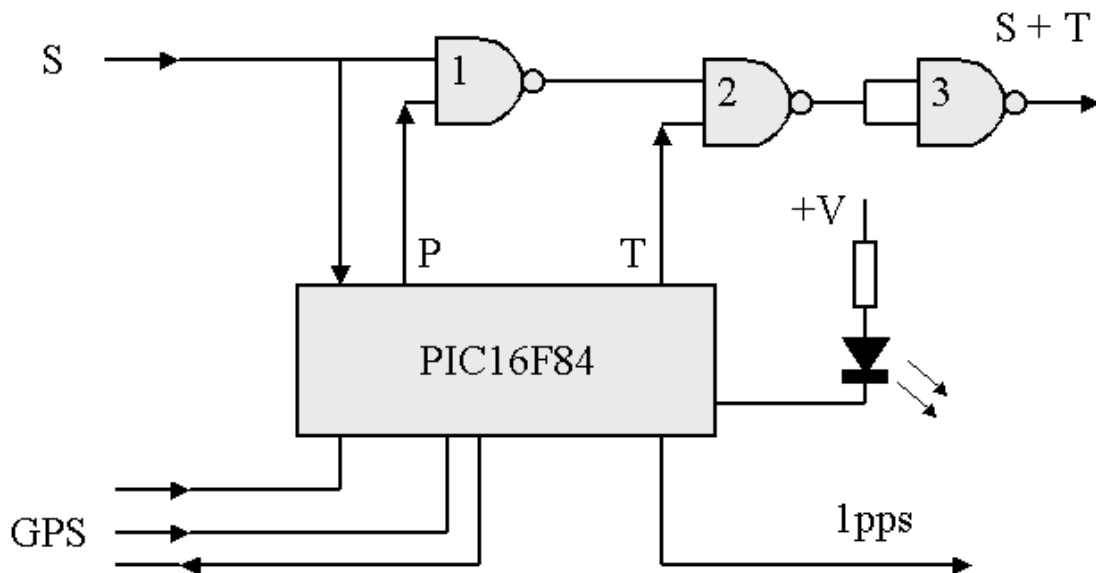


Figura 5-10. Circuito utilizado para intercalar un código de tiempo en una secuencia de datos de sísmica (S). El microcontrolador PIC16F84 escucha la trama sísmica reconociendo cada final de dato, en este momento cierra la puerta (P 1) y transmite el tiempo (T 2). A la salida de la puerta (3) tenemos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

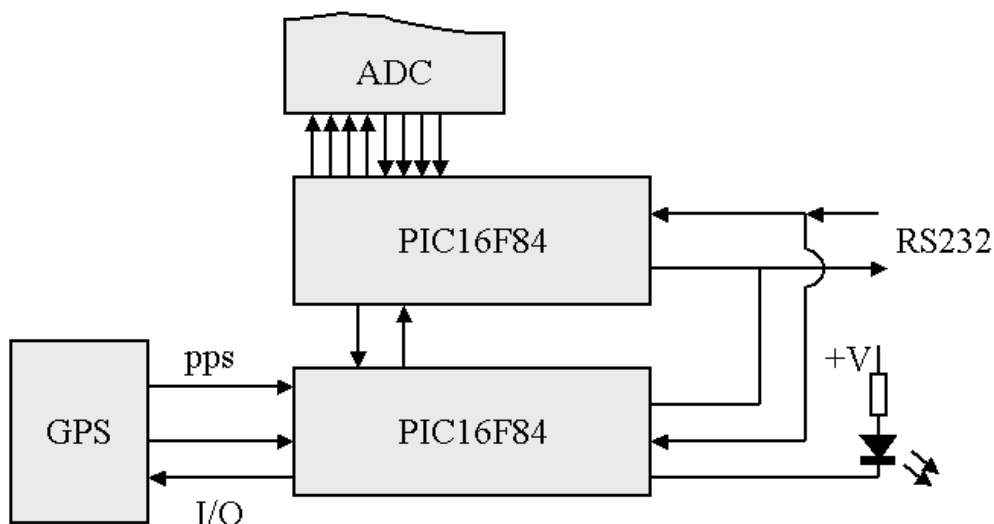


Figura 5-11. Cuando el receptor GPS se puede disponer en el propio sistema de adquisición es posible integrar el código horario directamente en la secuencia sísmica. Para ello el microcontrolador del sistema GPS avisa al microcontrolador del sistema sísmico de que ha llegado un flanco de segundo y debe 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 $1/500000$ (2×10^{-6}).

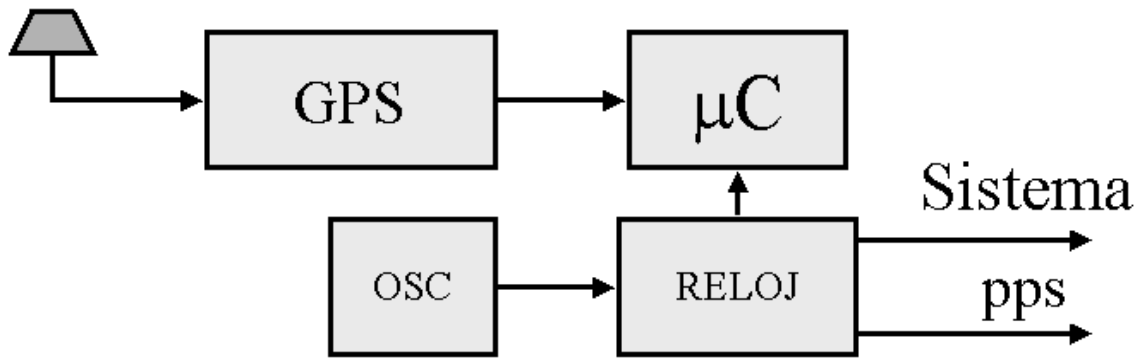


Figura 5-12. Para compensar los fallos de recepción del GPS se puede utilizar un reloj controlado por un oscilador de alta precisión (OSC) que se corrige continuamente mientras hay buena recepción.

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.

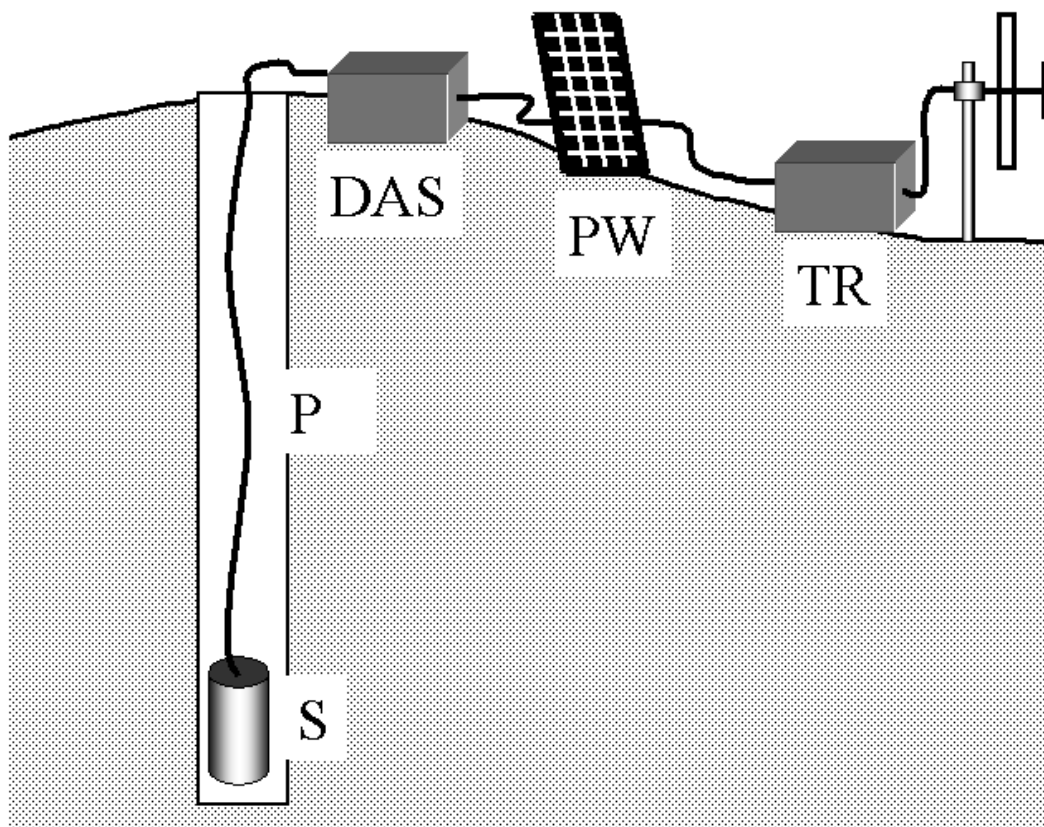


Figura 5-13. La instalación en sondeos permite mejorar la relación señal / ruido en todos los parámetros, sin embargo no es posible realizar operaciones de mantenimiento en los instrumentos. Una instalación típica consta de un sistema de sensores (S) situados en el interior de un sondeo (P), unidos por 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.

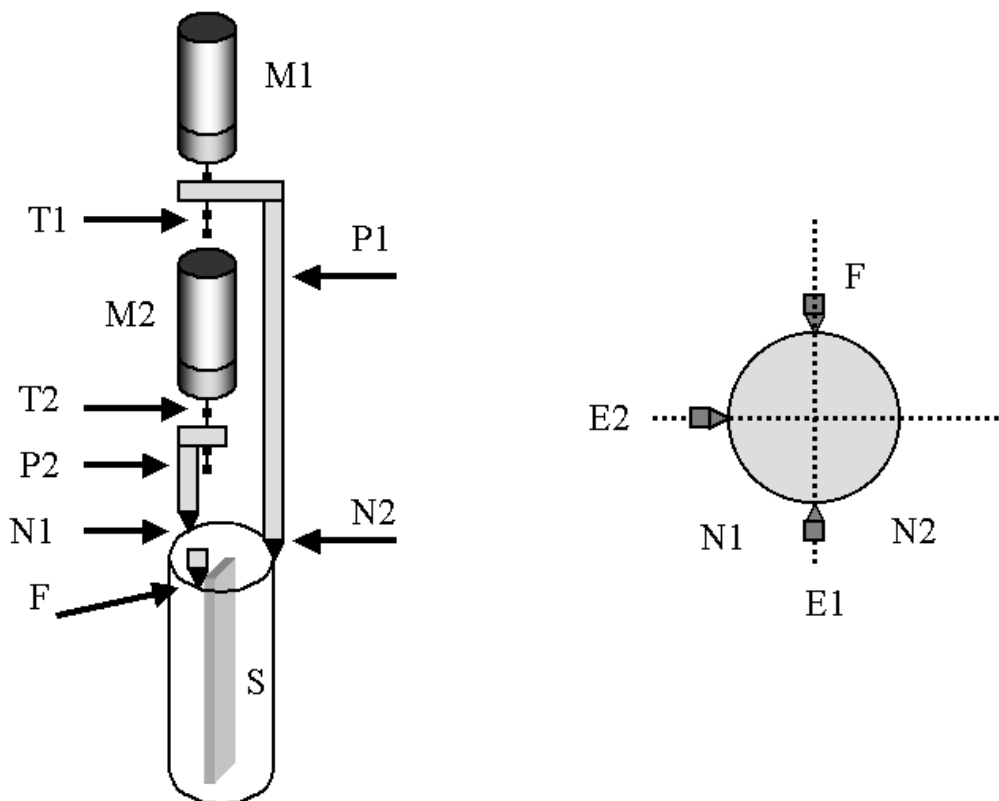


Figura 5-14. Sistema de nivelación. Dos pequeños motores (M1 y M2) con reductor actúan sobre dos tornillos (T1 y T2) y mediante un juego de palancas (P1 y P2), unidas al contenedor del sensor (S) mediante uniones flexibles (N1 y N2), permiten producir pequeños desplazamientos en el contenedor del sensor 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 CO₂ 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.

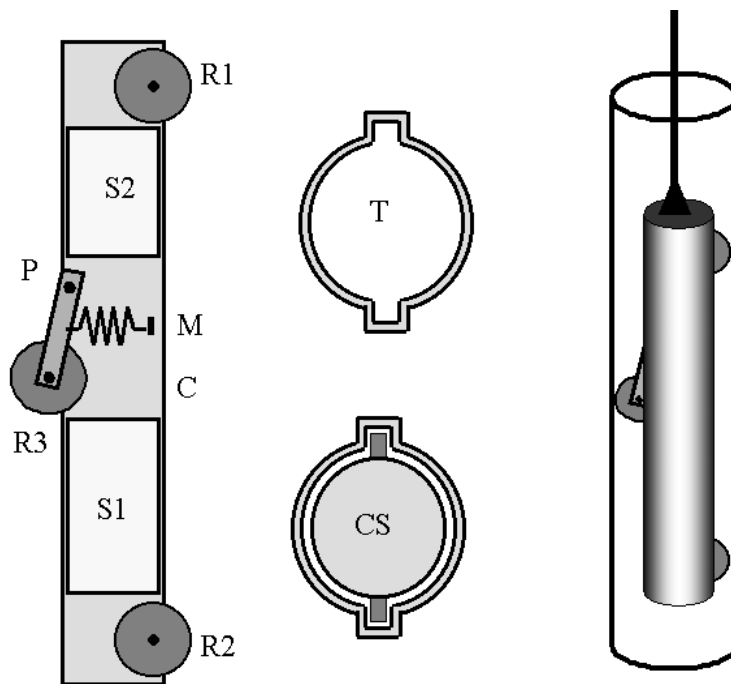


Figura 5-15. Cápsula para la introducción de sensores en un sondeo de poca profundidad. El sondeo está entubado con un tubo ranurado (T), dentro del cual se desplaza la cápsula (CS), guiada por un sistema de tres ruedas, dos de ellas fijas (R1 y R2), mientras que un sistema de palanca (P) y muelle (M)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

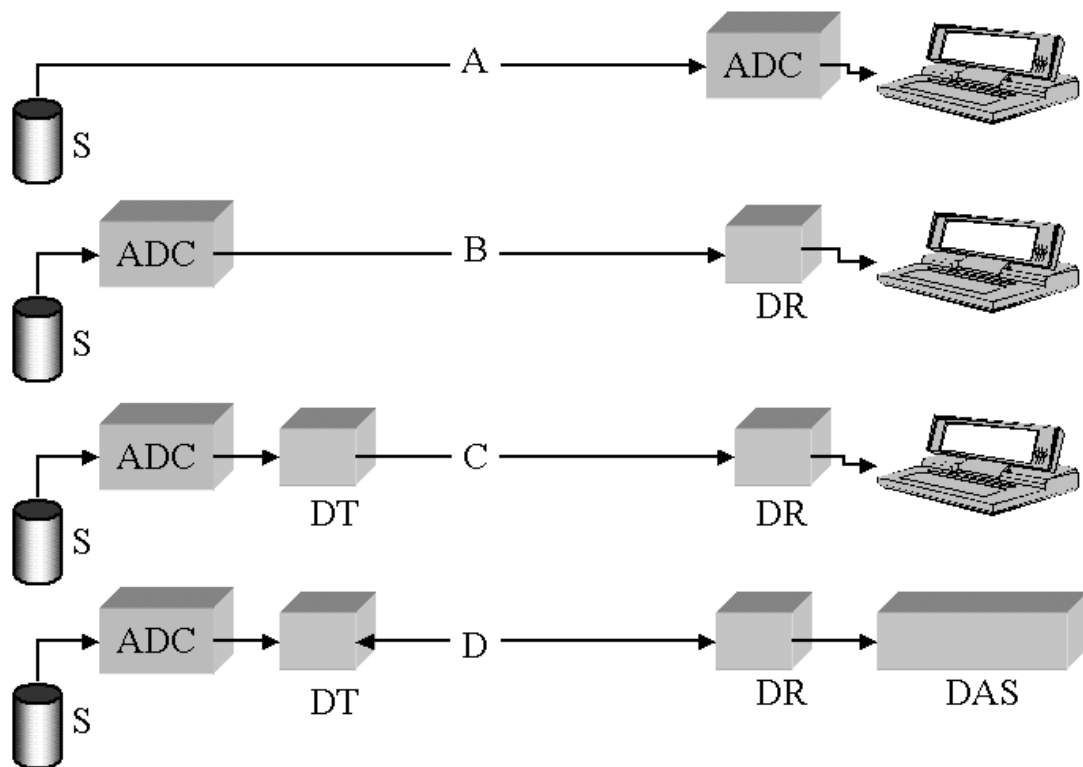


Figura 5-16. A) conexión directa, toda la electrónica esta en superficie. B) los electrónica de adquisición está junto a los sensores, conexión directa a un Pc en superficie. C) se utiliza un circuito de aislamiento galvánico entre la electrónica y las líneas de transmisión. D) se utiliza un sistema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

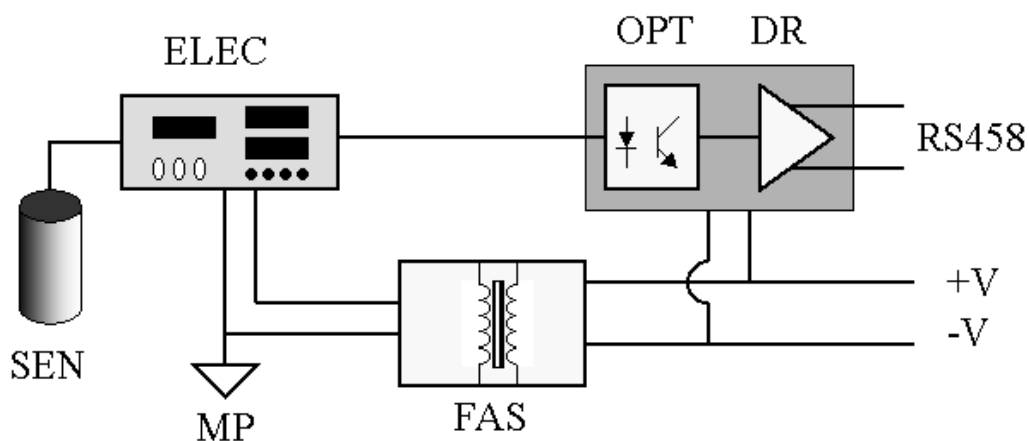


Figura 5-17. Es conveniente aislar la línea de datos y alimentación de la electrónica de los sensores y del sistema de adquisición. Para ello la mejor solución es utilizar opto-aisladores y fuentes de alimentación conmutadas. La figura muestra el circuito de salida del sistema de sensores: (ELEC) es 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.

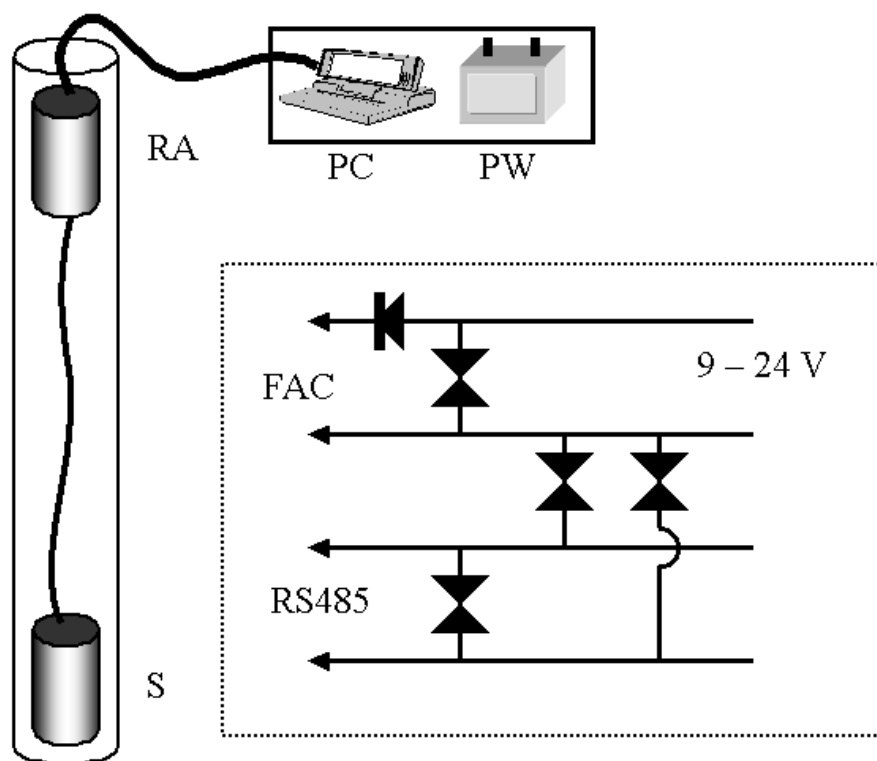


Figura 5-18. Esquema del circuito de protección para las líneas de datos RS485 y de alimentación. Todos los diodos son del tipo especial para supresión de transitorios. Este circuito se repite en los dos extremos del cable. La instalación en el pozo se hace de forma que el cable de conexión con los sensores 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

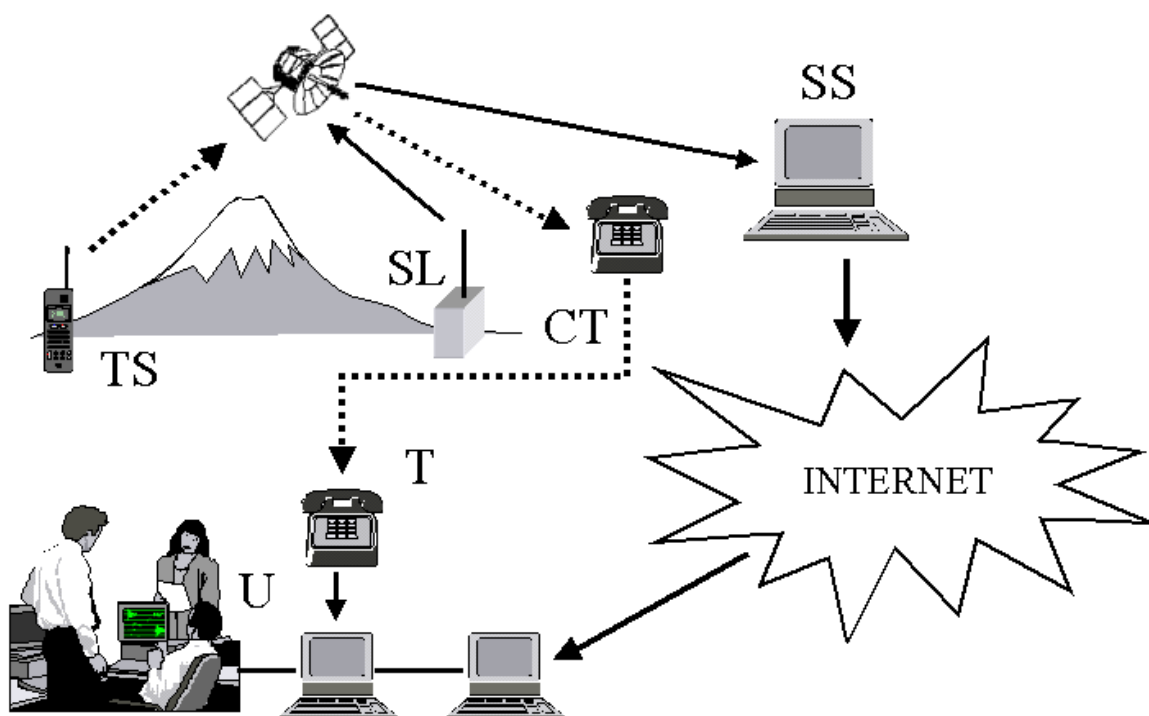


Figura 5-19. Actualmente es posible utilizar enlaces satelitales para acceder a los instrumentos situados sobre el volcán. Una posibilidad es utilizar sistemas de telefonía por satélite (TS) que conectan a través de una compañía telefónica (CT) al teléfono del centro volcánológico (T). Otra posibilidad 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 asumirlos. 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.

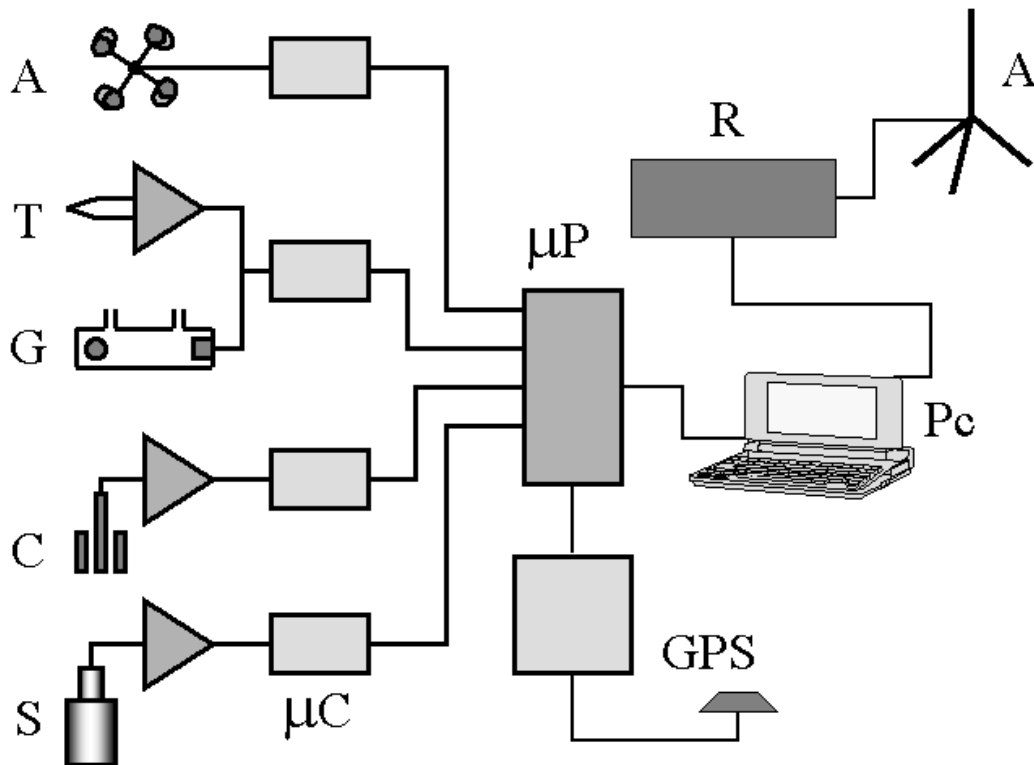


Figura 5-20. Ejemplo de estación para el seguimiento de la actividad volcánica con telemetría satelital. A anemómetro, T termómetro, G gases, C clinómetros, S sismómetro. Para facilitar la implementación del sistema cada sensor posee su sistema de microproceso independiente μC . La información es canalizada 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 ₂	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 CO₂, 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 CO₂ ya que la difusión de este gas es posible medirla a distancias considerables del centro activo. Los sensores para otros gases, como H₂S, SO₂, 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.