

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.

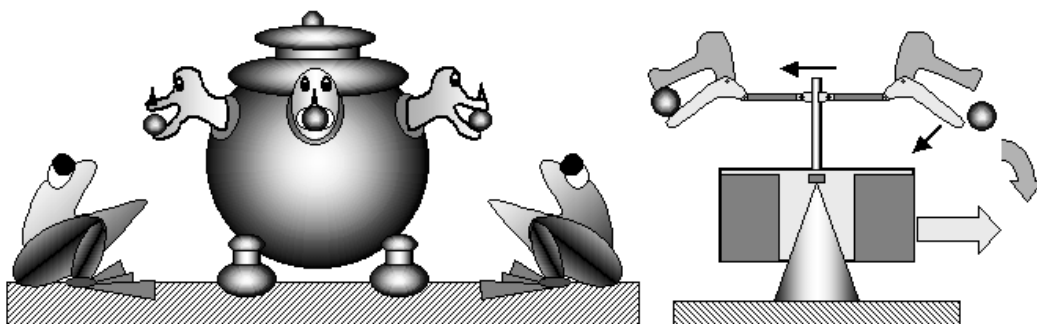


Figura 10-1. Representación de un sismoscopio chino. Una gran masa está suspendida, constituyendo un péndulo invertido. Cuando se produce un movimiento fuerte, el sistema de palancas libera las esferas retenidas en las bocas de los dragones que caen dentro de las ranas colocadas a su alrededor.

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.

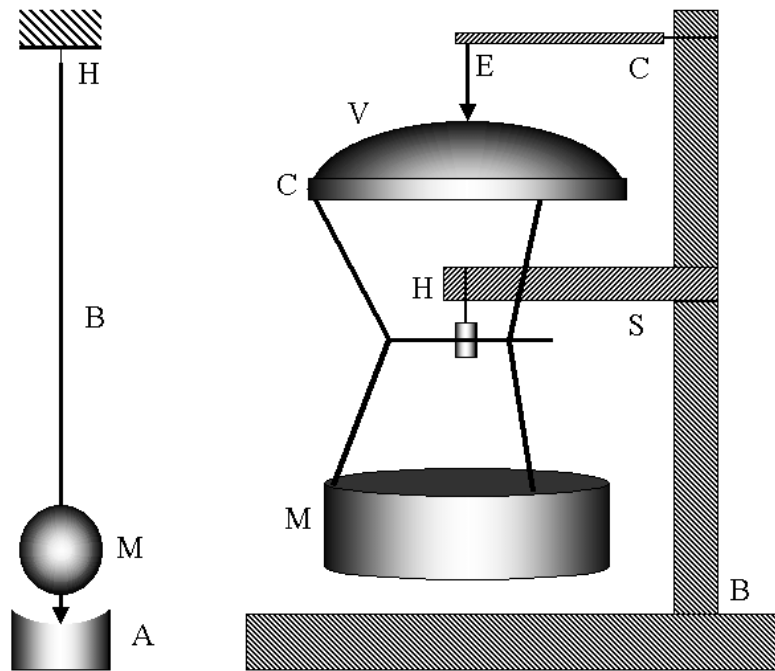


Figura 10-2. Un sismoscopio elemental puede construirse mediante un simple péndulo formado por una barra B con una masa en su parte inferior, dotada de un estilete que dibuja en un lecho de arena el movimiento relativo del péndulo. Un dispositivo de este tipo funcionó a fines del siglo XVIII en el Vesuvio. 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.

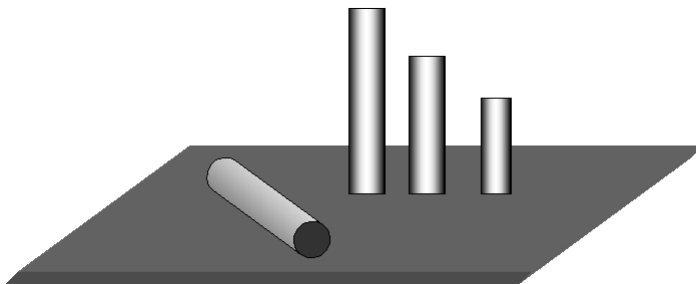


Figura 10-3. Otro dispositivo muy sencillo para tener una información sobre la aceleración máxima del suelo se puede construir simplemente con cilindros metálicos de distintas alturas. Sometiéndolos a aceleraciones conocidas se determina a que aceleración cae cada cilindro

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.

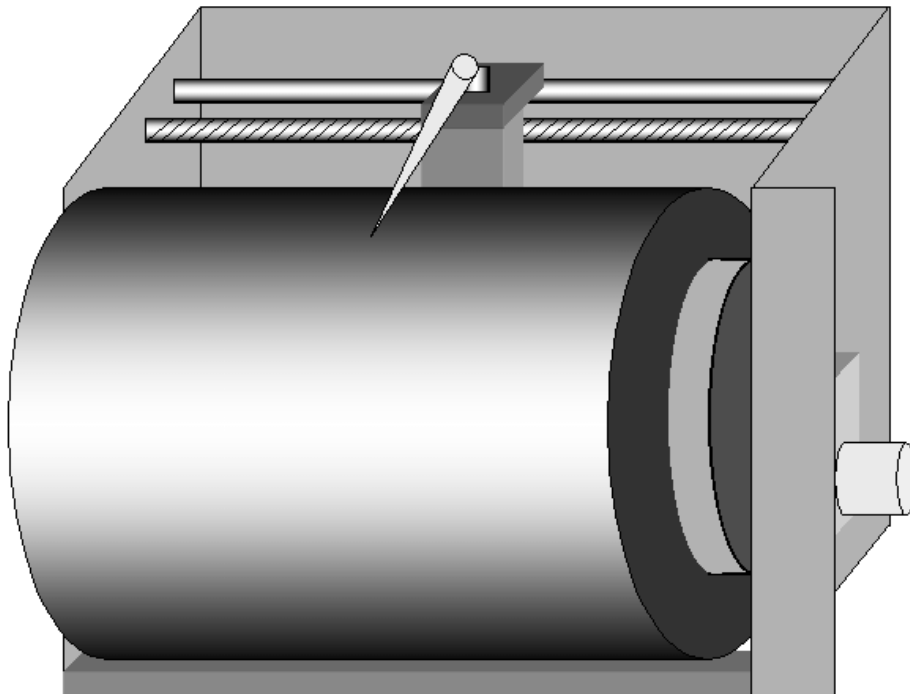


Figura 10-4. Un registrador de tambor está constituido por un tambor que gira uniformemente mientras la pluma de un galvanómetro se desplaza horizontalmente mediante un husillo. Uno o dos motores paso a paso controlan el movimiento.

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.

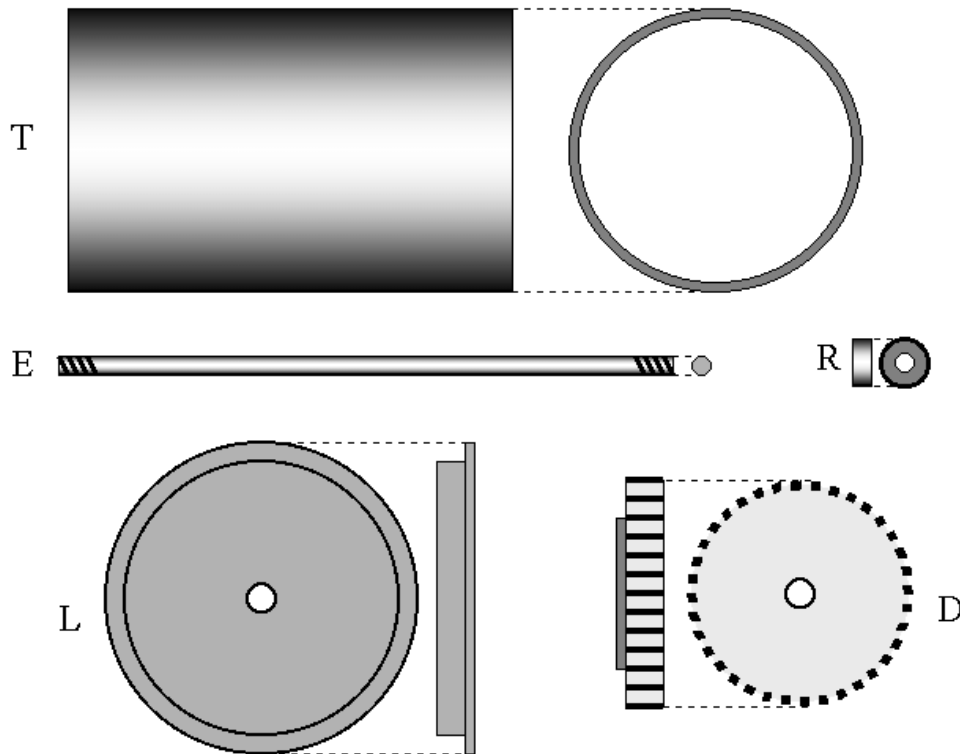


Figura 10-5. La realización de un registrador de tambor se inicia construyendo el tambor propiamente dicho. Ya que de sus dimensiones finales dependen todas las otras piezas. Tambor, tapa, eje, rodamiento, polea dentada. T tambor, L tapa lateral, E eje, R rodamiento, D polea (dentada).

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).

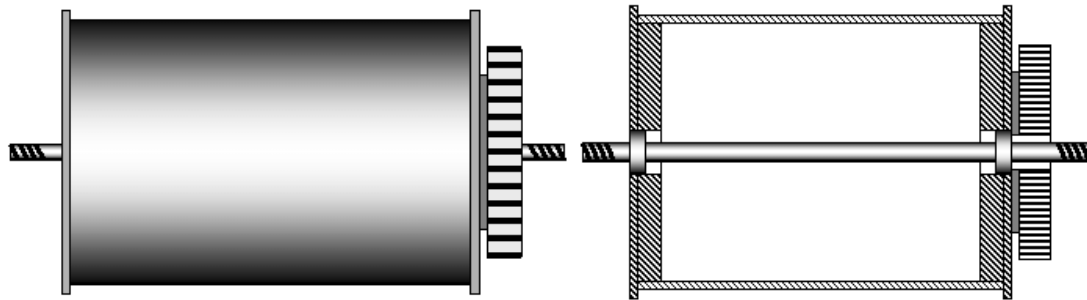
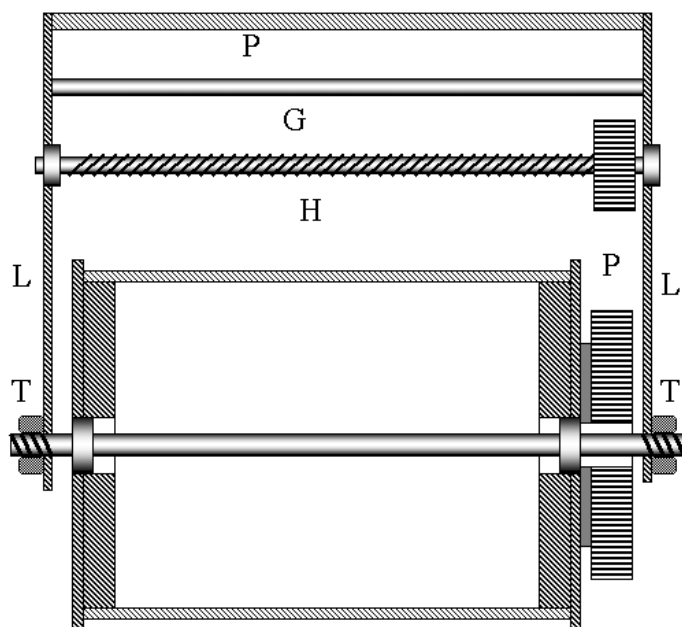


Figura 10-6. El conjunto del tambor montado. El tambor debe poder girar libremente alrededor del eje. Si se dispone de un buen taller mecánico se puede acoplar la polea de arrastre al tambor mediante un dispositivo de embrague. En caso contrario, se fija mediante tornillos.

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.

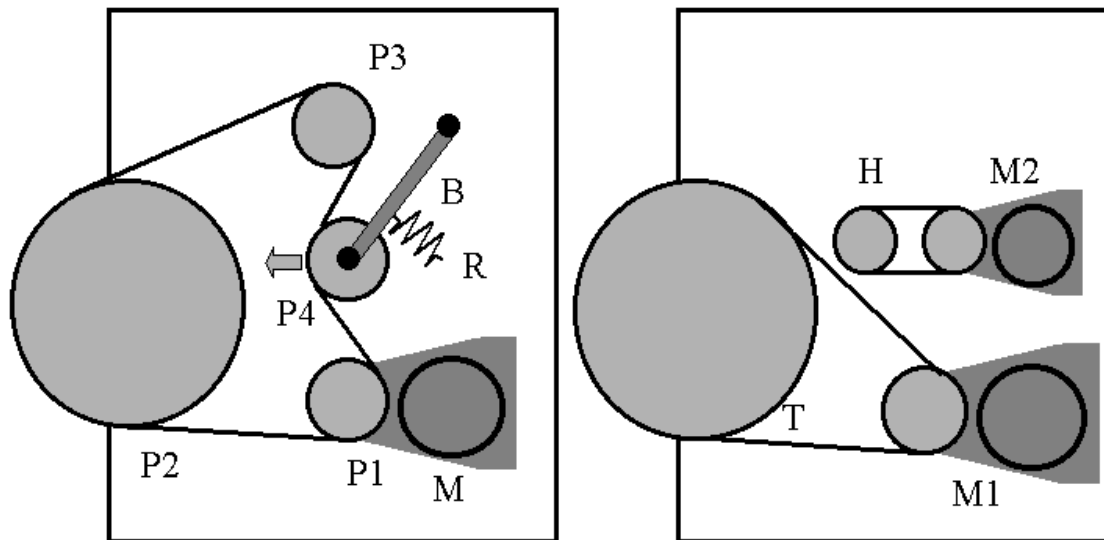


Figura 10-8. Sistema de arrastre mediante un único motor para rotación y traslación y utilizando motores independientes. M motor, P1 polea motriz, P2 polea de rotación, P3 polea de arrastre, P4 polea tensora. En el caso de utilizarse dos motores el sistema es más sencillo M1 motor de rotación, T polea 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.

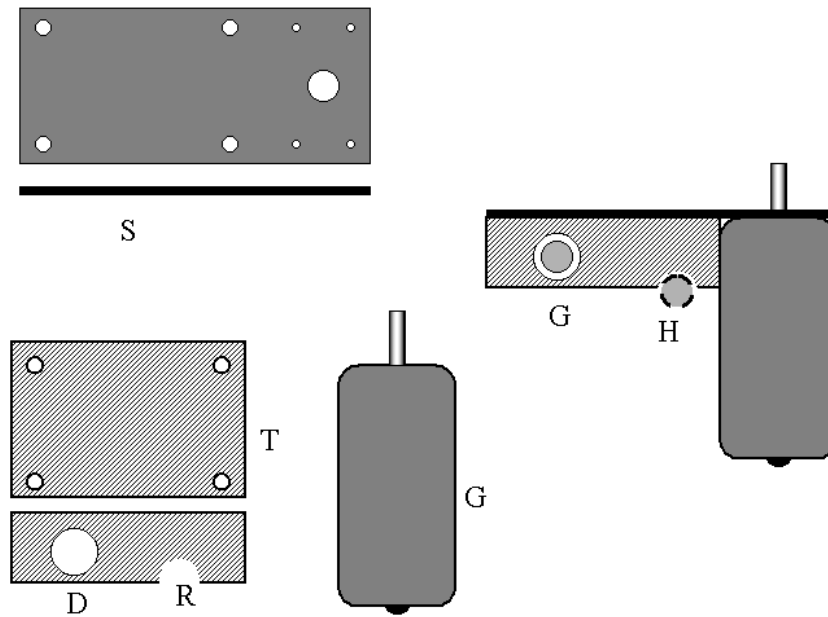
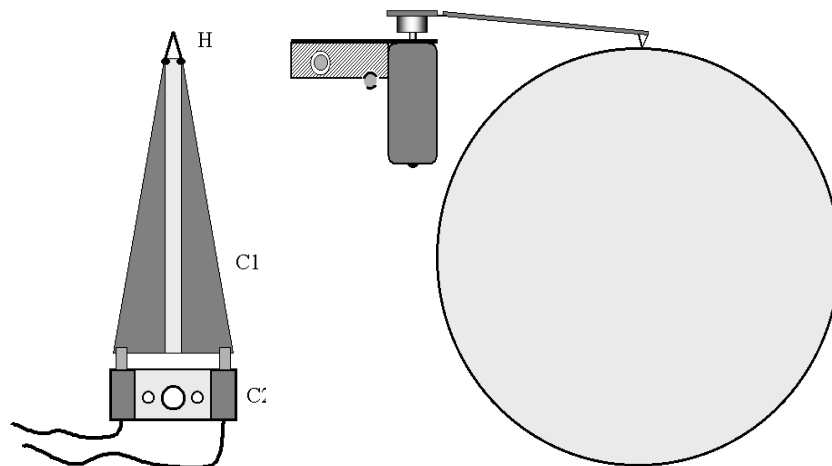


Figura 10-9. Soporte del galvanómetro y acoplamiento al husillo. S soporte, T pieza de arrastre (teflón) G galvanómetro, H husillo, G barra guía. Para facilitar el desplazamiento sobre la barra guía, es conveniente colocar un rodamiento lineal D en el interior de la pieza de arrastre.

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 SAA1042, 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.

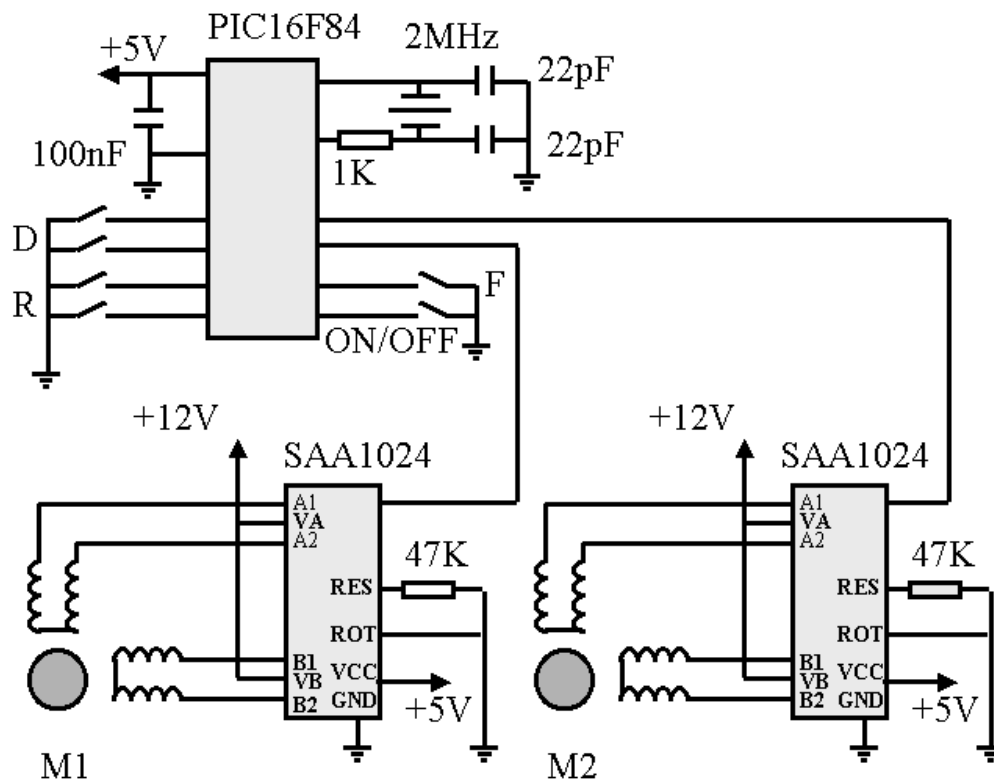


Figura 10-11. Circuito de control de los motores pasa a paso. Utiliza un microcontrolador PIC16F84 y uno o dos driver para motores paso a paso SAA1042..

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

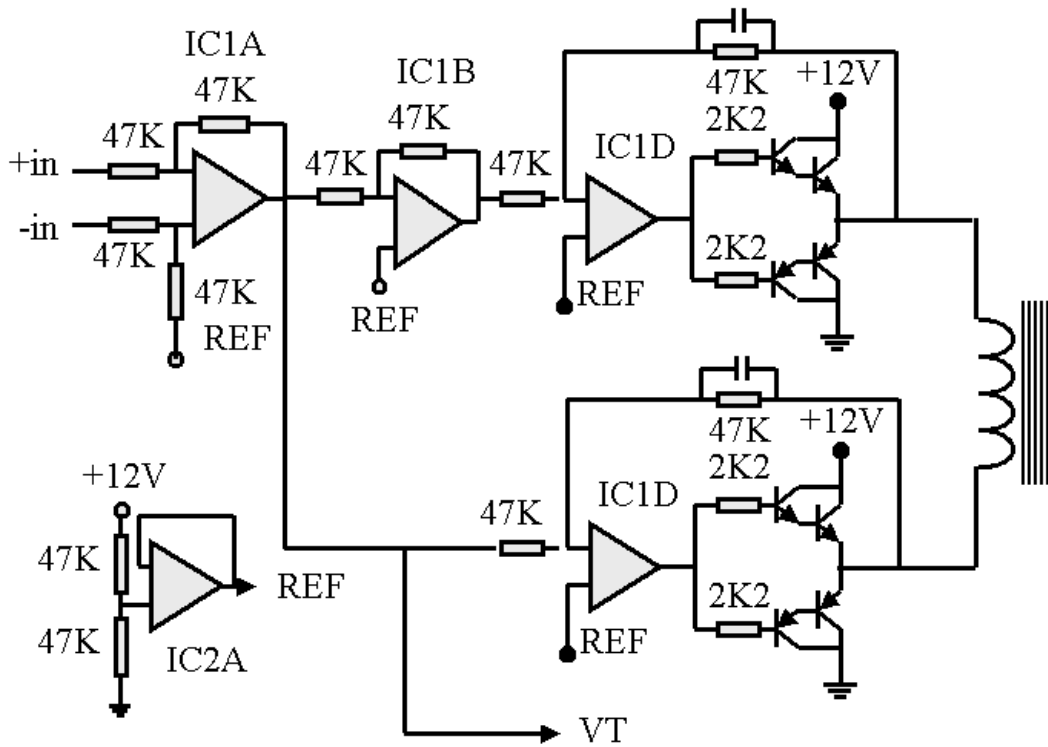


Figura 10-12. Amplificador para el movimiento de la pluma. Se utiliza un amplificador diferencial con dos pares de transistores complementarios de salida.

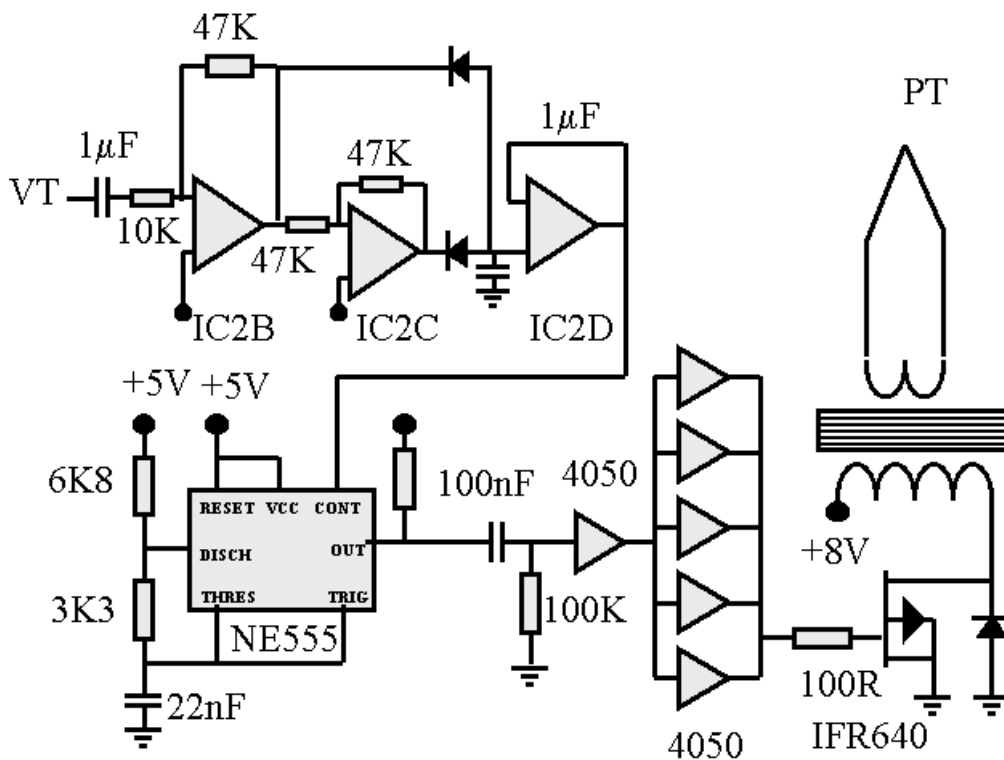


Figura 10-13. Circuito de control de la temperatura de la pluma. Utiliza un rectificador de doble onda y un oscilador controlado por tensión (NE555).

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.

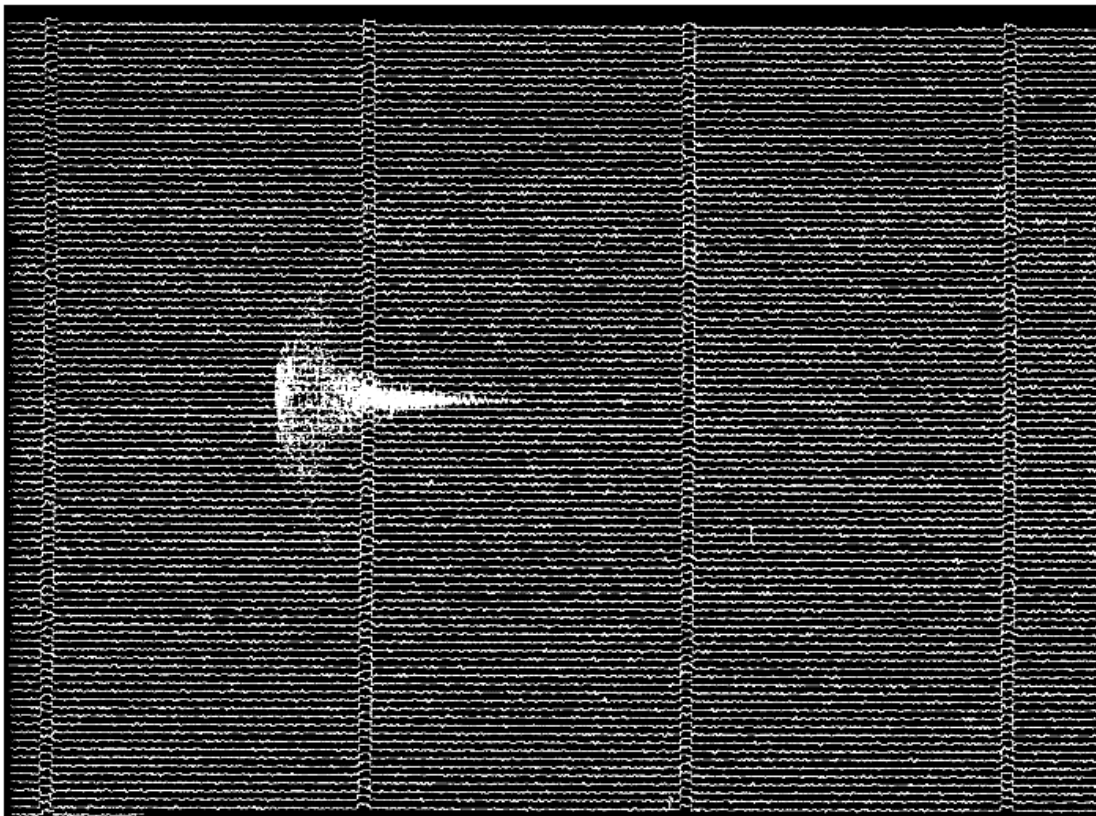
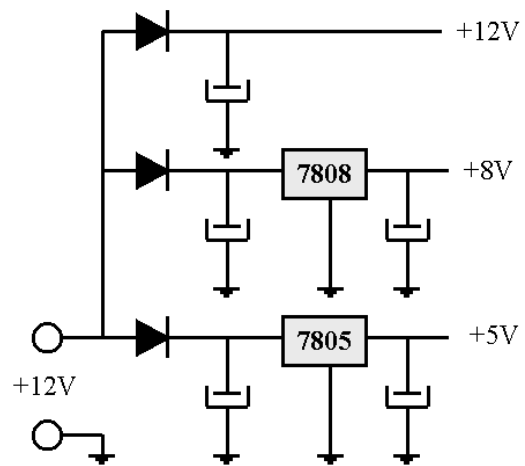


Figura 10-15. Ejemplo de registro analógico de un evento sísmico obtenido mediante un registrador de tambor sobre papel ahumado.

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.

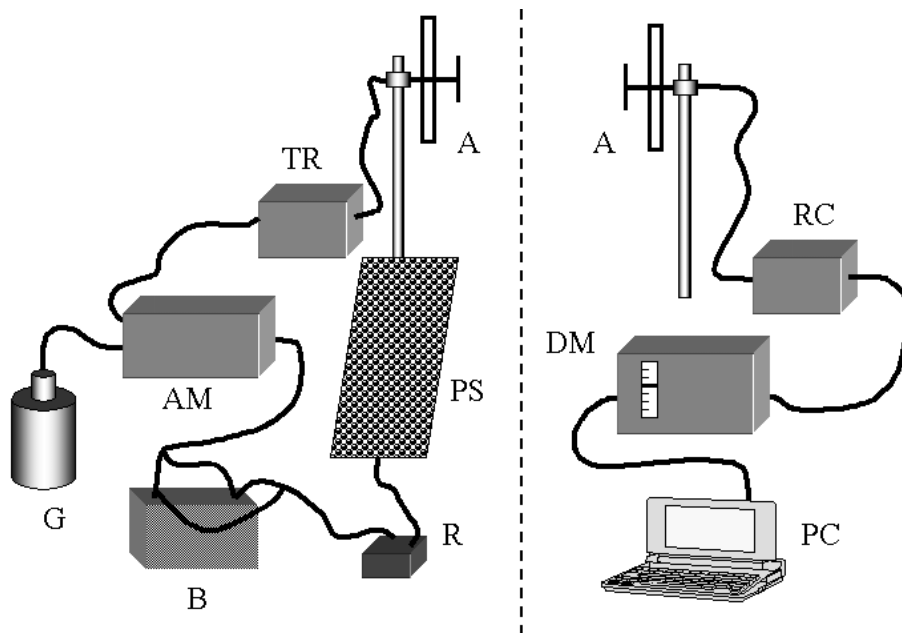


Figura 10-16. Diagrama bloque de un sistema de telemetría sísmica analógica. El equipo de campo lo constituyen los siguientes elementos: G geófono, AM amplificador modulador, TR transmisor, A antena, PS panel solar, R regulador de carga. El equipo de recepción está formado por A antena, RC receptor, 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.

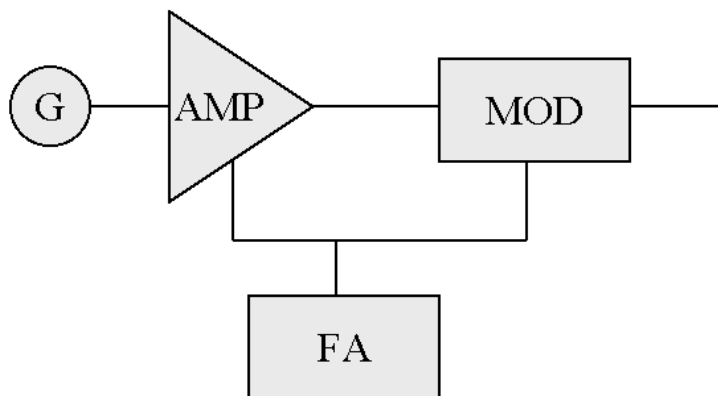


Figura 10-17. Diagrama bloque de un sistema de telemetría sísmica analógica. Parte correspondiente al equipo de campo. G geófono. AMP amplificador. MOD modulador. FA fuente de alimentación.

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)

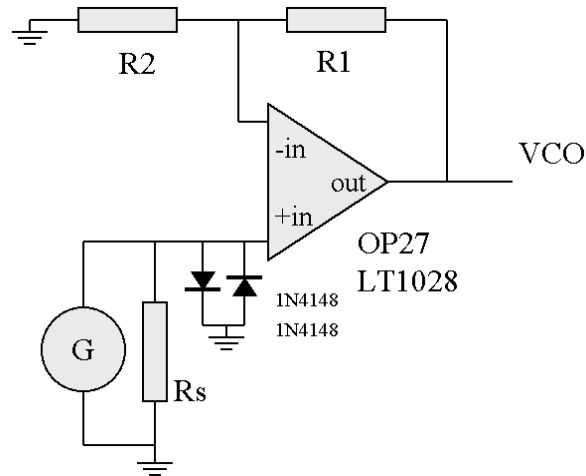


Figura 10-18. Amplificador para un sensor electromagnético de 1 Hz. G geófono. Rs resistencia de amortiguamiento. R1 y R2 resistencias para ajuste de la ganancia ($A = 1 + R1/R2$)

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 Ω). 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 Ω y la ganancia del orden de 30, lo que sugiere para R1 un valor normalizado de 68 K Ω . 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.

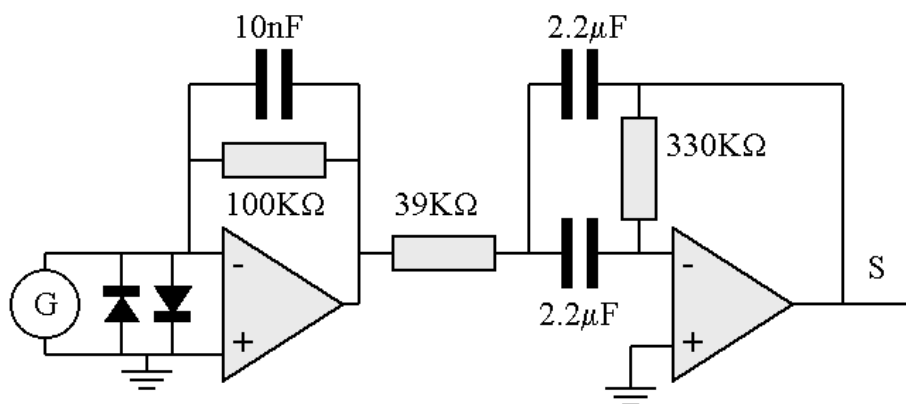


Figura 10-19. Amplificador un geófono G de 4.5 Hz. con respuesta extendida. S salida. La ganancia se ajusta variando la resistencia del operacional de entrada. Debe ser de bajo ruido como LT1028 o OP27. El operacional de salida es un TL061 o LF155 de alta impedancia de entrada.

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.

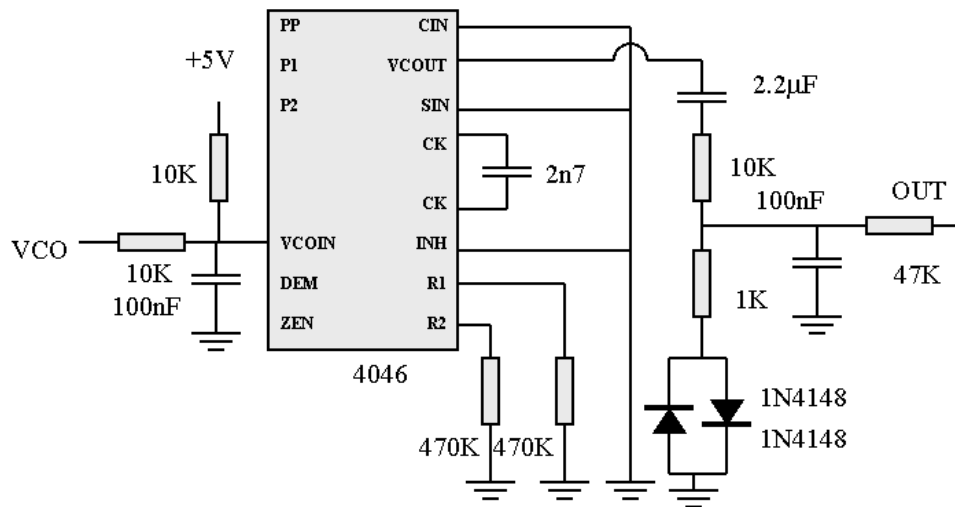


Figura 10-20. Oscilador controlado por tensión (VCO). La entrada VCO debe conectarse a la correspondiente la salida del amplificador. Obsérvese el circuito integrador – recortador utilizado para obtener una señal aproximadamente sinusoidal a partir de la onda cuadrada proporcionada por el 4046.

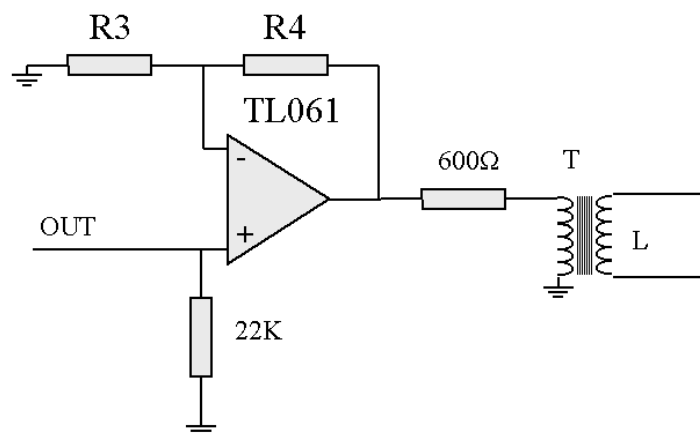


Figura 10-21. Adaptador para línea telefónica. La amplitud de la señal se ajusta mediante R3 y R4. Valores tentativos 1 KΩ para R3 y 4.7 KΩ para R4.

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 Ω . La entrada se polariza a V/2 mediante un divisor resistivo formado por dos resistencias de 10 K Ω . 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 Ω . 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.

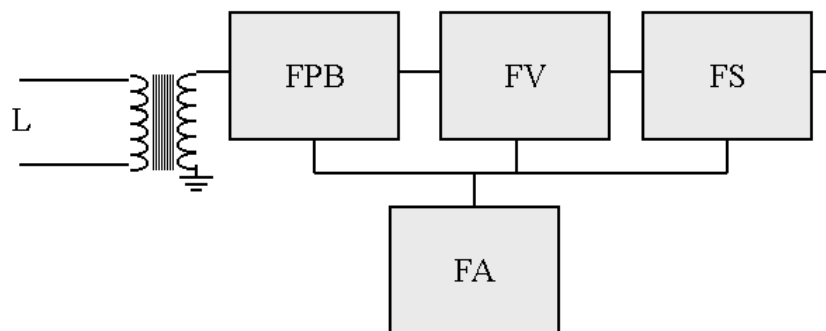


Figura 10-22. Diagrama bloque de un sistema de telemetría sísmica analógica. Parte correspondiente al sistema de recepción. L línea de entrada. FPB filtro pasa banda. FV demodulador. FS filtro de salida. FA fuente de alimentación.

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.

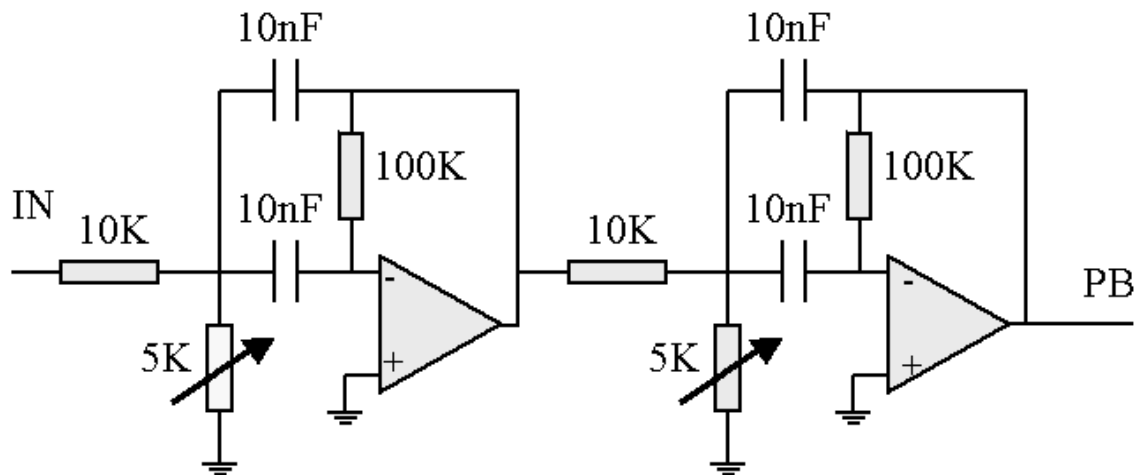


Figura 10-23. Circuito de los filtros pasa banda. El ajuste a la frecuencia nominal del canal se consigue mediante los potenciómetros de 5 K Ω . Los valores se han calculado para sintonizar un canal de 1024 Hz. Para trabajar a con canales más altos habrá que modificar los condensadores de 10 nF.

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).

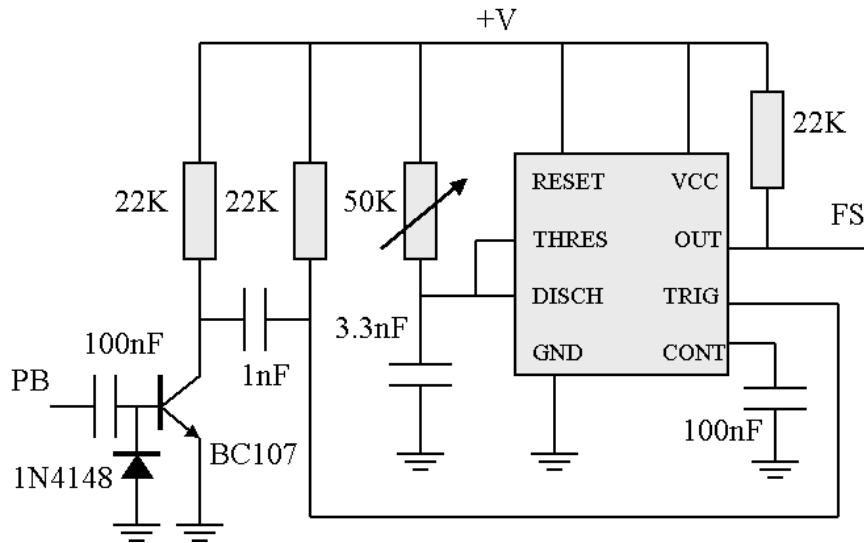


Figura 10-24. Conversor frecuencia tensión. Se utiliza un integrador de impulsos de duración fija. El monoestable realizado con un circuito NE555 genera un pulso constante para cada flanco descendente de la señal de entrada. El filtro de salida integra estos pulsos y recupera la señal original.

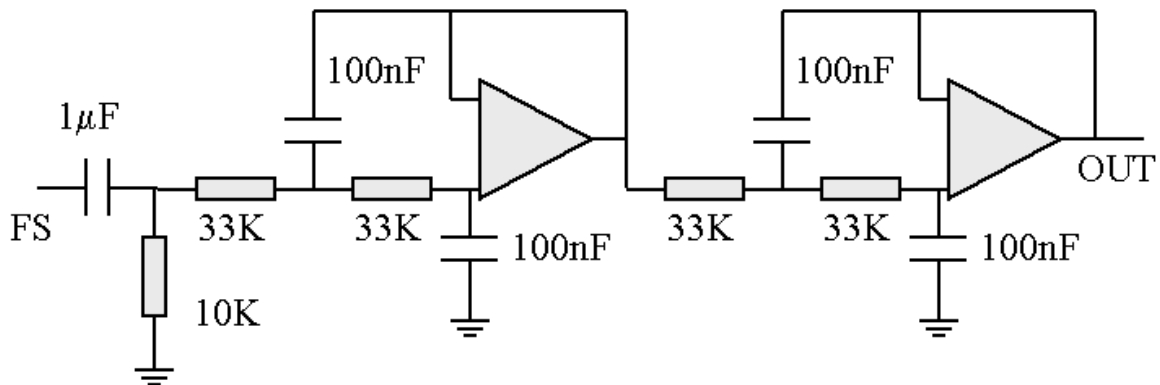


Figura 10-25. Filtro pasa bajos de salida. Se trata de un montaje clásico de un filtro de cuatro polos. Es suficiente para la mayoría de las aplicaciones.

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 saturan 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.

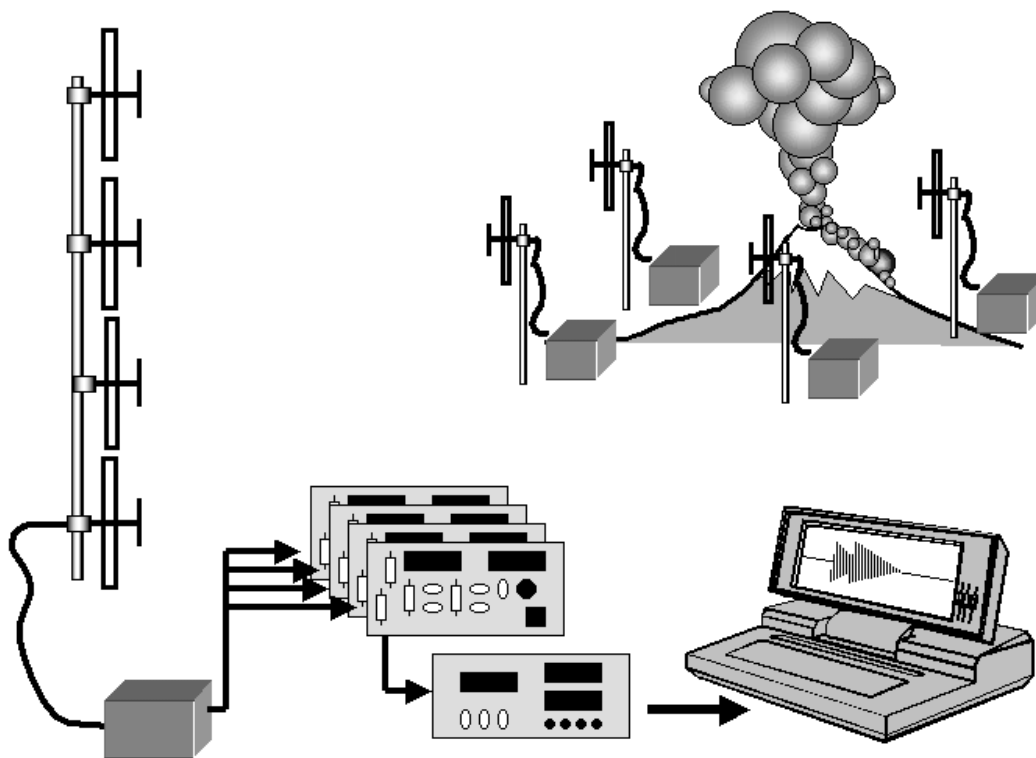


Figura 10-26. Red sísmica centralizada con telemetría analógica y registro digital. A la salida del sistema analógico hay que añadir un conjunto de filtros (o modificar los existentes), un conversor analógico digital con suficiente número de canales de entrada y un computador.

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.

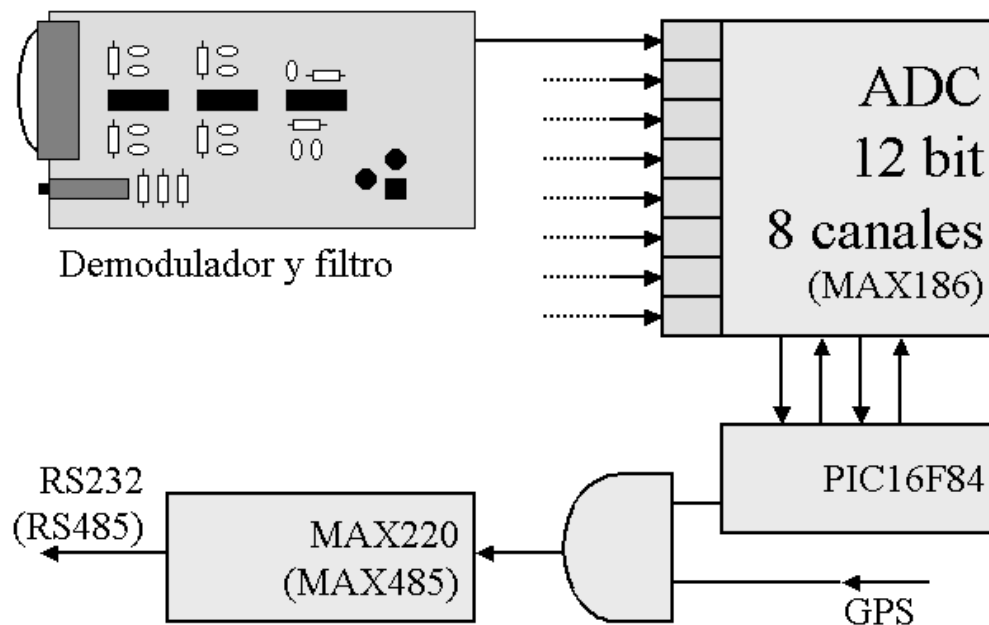


Figura 10-27. La digitalización de un red sísmica con telemetría analógica se realiza mediante un conversor analógico digital de 12 bits y 8 canales de entrada (como el MAX186) controlado por un microcontrolador PIC16F84 y un adaptador de niveles CMOS a RS232 realizado con un MAX220 (o MAX232). Además 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 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 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.

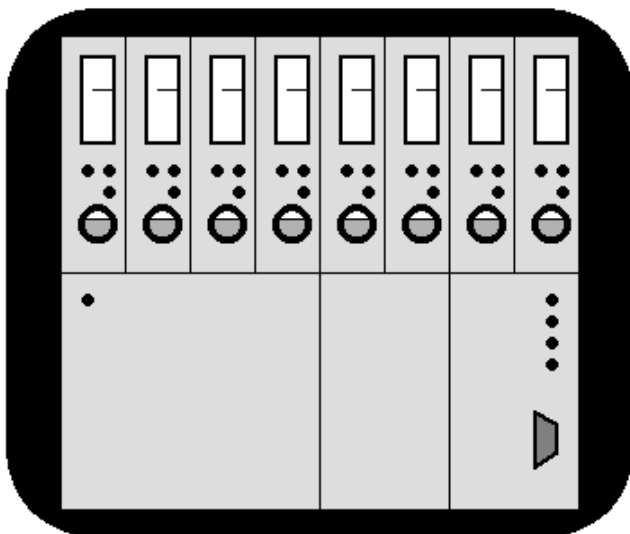


Figura 10-28. El montaje final se hace sobre placas normalizadas DIN160, de modo que pueda disponerse todo el sistema en un módulo doble, con el conjunto de los 8 demoduladores en la parte superior y situando el convertor, la fuente de alimentación y el receptor GPS en la parte inferior. De esta forma 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.

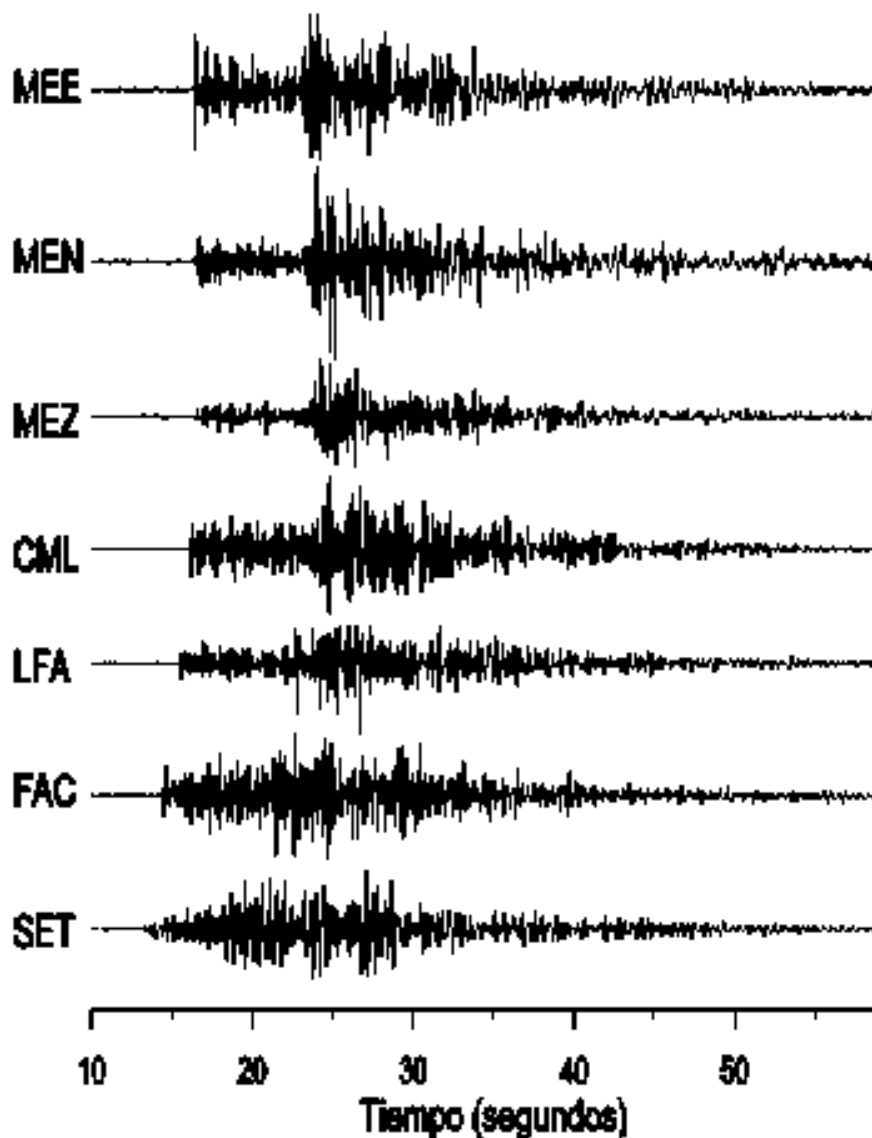


Figura 10-29. Ejemplo de registro sísmico obtenido en la red sísmica del Centro de Volcanología de la Universidad de Azores utilizando telemetría analógica y registro sísmico centralizado.

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.

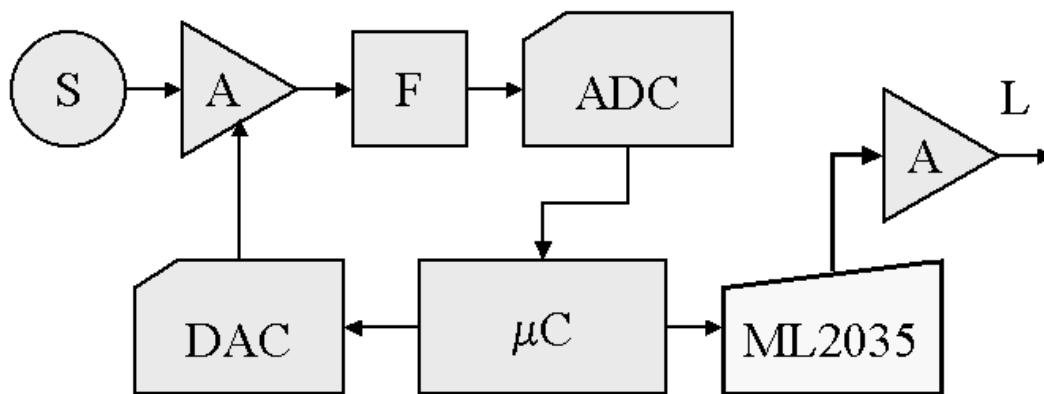


Figura 10-30. Sistema híbrido: la señal procedente del sensor S se amplifica A, se filtra F y se convierte a digital mediante un conversor de 12 bits ADC controlado por un microprocesador μC . El offset se cancela mediante un conversor digital analógico DAC. La señal modulada en frecuencia se obtiene mediante un oscilador sinusoidal controlado digitalmente ML2035