

# USO DE LA RADIOLOCALIZACIÓN EN LA EXPLORACIÓN DE CAVIDADES

Grupo de espeleología Comando (G.E.C.)

Fotografías: Grupo de espeleología Comando (G.E.C.)

## 1- INTRODUCCIÓN.

La radiolocalización es el proceso de localizar algo mediante el uso de ondas de radio. Dentro de esta técnica se encuentra la radiogoniometría que consiste en la localización de un punto emisor de ondas de radio mediante el uso de receptores adecuados que nos permiten determinar el ángulo de procedencia de la señal y su intensidad. La radiogoniometría ha sido muy utilizada para la determinación de emisoras de radio con fines militares e incluso a nivel de aficionado (caza del zorro).

La gama de frecuencias utilizadas en emisoras al aire libre abarca desde unos cientos de Hercios (Hz) hasta el rango de los GigaHercios (GHz).

La radiolocalización (o radiogoniometría) dentro del contexto espeleológico, es el procedimiento usado para la determinación de la posición y profundidad de un emisor de radio situado en el interior de la cavidad mediante medidas en la superficie con un receptor adecuado. Esto permite entre otras cosas la corrección de datos topográficos y la búsqueda de aportes, surgencias o nuevas bocas de acceso a la cavidad.

Esta técnica se empezó a usar a mediados de los 50 cuando el uso de los primeros sistemas transistorizados permitió la obtención de emisores de un tamaño razonable para su uso en minas y cavidades.

Debido a que las ondas de radio tienen dificultad para atravesar materiales diferentes al vacío (o el aire), se ven fuertemente atenuadas por la roca caliza (o cualquier otro tipo de roca) presente en las cuevas. Afortunadamente esta atenuación es menor conforme se baja la frecuencia del emisor, por lo que tradicionalmente se utilizan las bajas frecuencias (very low frequency, VLF) en el rango de unos pocos Hz o KiloHercios (KHz).

Nuestro grupo de espeleología (G.E.COMANDO), dentro del colectivo de EXTOPOCIEN lleva varios años trabajando en la exploración y alzamiento topográfico del sistema de la cueva de Los Chorros en Riopar (Albacete). La cueva de Los Chorros es un sistema bastante complejo y para ciertos ajustes topográficos así como para la localización de otras posibles entradas al sistema, se había construido por otros compañeros de EXTOPOCIEN, un radiolocalizador. Con dicho aparato se habían conseguido resultados exitosos pero tiene un rango de aplicación inferior a unos 60 metros de profundidad, lo que lo hace inútil en ciertas partes del sistema de chorros que superan esta profundidad, llegando a los 200 o más metros. En el presente artículo pretendemos dar unos conocimientos generales de los fundamentos, desarrollo y uso de un radiolocalizador construido por nosotros que permite superar las limitaciones del anterior modelo. Este sistema fue construido en una versión simplificada en junio-julio del 2003 y posteriormente sometido a mejoras y ampliaciones.

## 2- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El modelo esta basado en un diseño de Brian Pease (ver nota-1 al final del artículo). Posee un emisor relativamente simple, pero el receptor es de una gran complejidad.

### 2.1- Emisor



Foto-1. Vista del interior del emisor

La parte electrónica (Foto-1), es básicamente un generador de pulsos rectangulares a una frecuencia exacta de 3496 Hz con una anchura de pulso de 1/16 del ciclo. La frecuencia está controlada por un cristal de cuarzo de 3,579545 MegaHercios (MHz) y por tanto posee una extraordinaria estabilidad. Esto permite luego utilizar en el receptor unos filtros de una gran selectividad.

Estos pulsos son transmitidos a la bobina emisora que los convierte en una onda senoidal pura y a la vez son amplificados (amplificador clase E).

La eficacia de todo el conjunto está sobre el 95%. La bobina emite continuamente un potentísimo campo magnético sinusoidal (entre 4 y 6 Vatios) exactamente a 3496 Hz, capaz de destruir en segundos cualquier sistema de almacenamiento magnético de memoria que este en sus proximidades (tarjetas de banco, teléfonos móviles, ciertos relojes...), pero bastante inofensivo para el cuerpo humano. La bobina emisora, que en realidad es un circuito “tanque” LC en paralelo, esta sintonizada mediante el uso de los condensadores adecuados (C) sobre el valor real de la inductancia de la bobina (L), exactamente a 3496 Hz.

Nuestra bobina, de diseño propio, esta construida sobre un robusto bastidor de madera resistente a la humedad y es de sección rectangular de 56 x 40 cm para facilitar el paso en zonas estrechas. Posee tres patas de plástico regulables en altura y desmontables y dos niveles de burbuja perpendiculares entre si que facilitan la nivelación horizontal, posición de trabajo en el interior de la cavidad (Foto-2).



Foto-2. Bobina emisora

Sus características son: Bobinado de cobre con hilo aislado de 2,5 mm de diámetro, 19 vueltas con toma intermedia en la 3ª. Inductancia del bobinado de 498 microHenrios ( $\mu\text{H}$ ). Condensadores de sintonía de unos 4,2 microFaradios ( $\mu\text{F}$ ). Ancho de banda 113 Hz. Los condensadores tienen que ser de polipropileno (MKP) o en el peor de los casos de poliéster (MKT) para evitar pérdidas de eficacia y excesivo desajuste de sintonía con las variaciones de temperatura (ver nota-2 al final del artículo). Para el ajuste de la sintonía del circuito “tanque” LC a 3496 Hz se mide inicialmente la inductancia de solo la bobina, se calcula el valor de

la capacidad de los condensadores necesarios, se instalan estos con un valor ligeramente inferior al calculado y se va añadiendo poco a poco mayor capacidad hasta conseguir el ajuste correcto. Para ello es de gran ayuda el uso de un generador de funciones y un osciloscopio. La bobina y condensadores de acoplo forman un conjunto robusto y el resto de la electrónica van en una pequeña caja estanca alimentada por una batería externa de plomo estanca (SLA) de 12 Voltios (V) y de 2 a 7 Amperios (A).

## 2.2- Receptor

El diseño de bloques del receptor esta representado en la figura-1 y figura-2. Consta de una bobina receptora con preamplificador incorporado, le sigue un amplificador variable con detector de sobrecarga, un detector de doble cuadratura controlado por un oscilador, un filtro pasa banda y finalmente un mVoltímetro de corriente alterna (CA) y un amplificador de audio

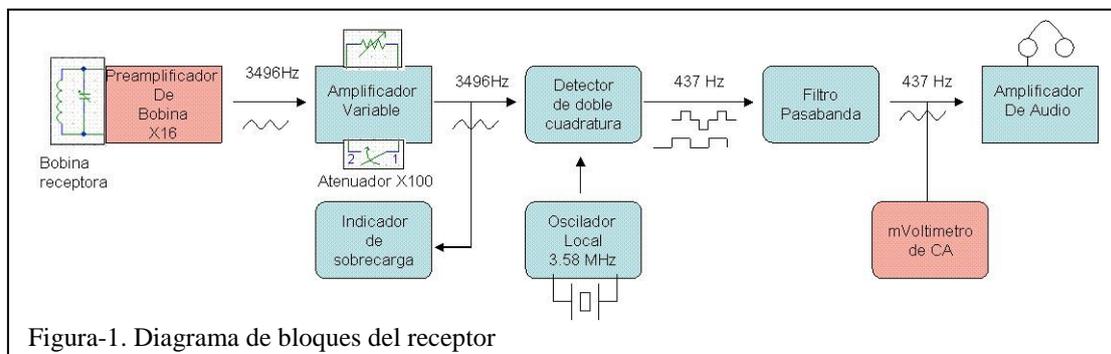
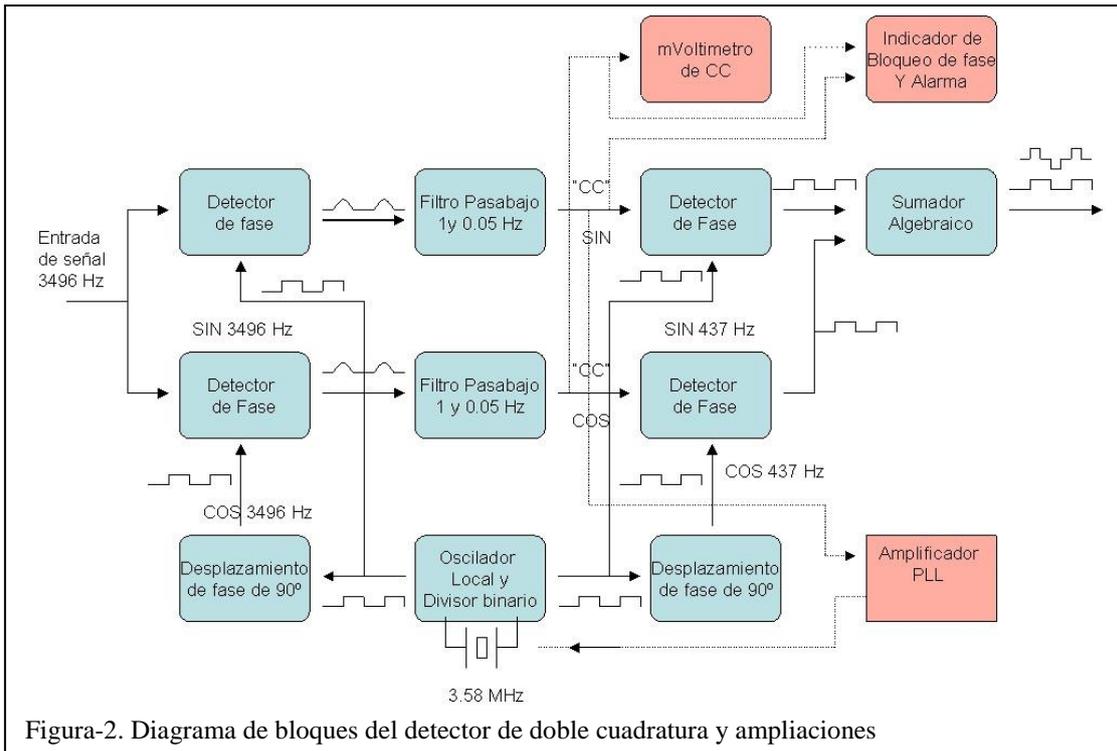


Figura-1. Diagrama de bloques del receptor



### 2.2.1- Bobina receptora



Foto-3. Zona central de la bobina receptora



Foto-4. Zona lateral de la bobina receptora

Es de nuevo una bobina sintonizada a 3496 Hz en configuración circuito "tanque" LC en paralelo. Nuestro diseño esta constituido por un chasis circular de madera impermeabilizada con tres niveles de burbuja que permite la precisa orientación vertical y horizontal (Foto-3 y Foto-4).

Sus características básicas son:  
 Diámetro de bobina de 56 cm. 747 vueltas de hilo aislado de 0,3 mm de diámetro. Inductancia de 914 mH. Condensadores de sintonía de unos 2,2 nanoFaradios (nF). Ancho de banda 200 Hz. Resistencia 348 Ω. Resistencia en resonancia unos 750 KΩ. El ajuste se realiza de manera idéntica a la bobina emisora. Los condensadores utilizados son de estiroflex, ya que son los más estables y precisos, pero difíciles de conseguir. Otra opción es usar de mica plateada. Cualquier otra opción dará problemas de variaciones de señal con las variaciones de temperatura (cosa muy habitual al trabajar en el exterior de la cavidad). Posee un pequeño condensador variable para hacer un ajuste fino sobre el terreno.

### 2.2.2- Preamplificador de bobina

Ni el diseño inicial nuestro ni el diseño de Brian Pease estaban

dotados de este preamplificador. Su incorporación constituye una importantísima mejora del sistema.



Foto-5. Preamplificador y caja

La forma inicial de conectar la bobina receptora al amplificador variable era con un cable apantallado directo de varios metros. Este cable, debido a su capacidad parásita, forma parte del ajuste de sintonía de la bobina receptora, por lo que cualquier alteración (alargamiento, rotura...) produce un desajuste de sintonía. Además la salida de la bobina es de alta impedancia, lo que unido a su longitud y baja señal origina numerosos problemas de ruidos parásitos al actuar como antena. La incorporación de dicho preamplificador soluciona todos los problemas.

Este consta de un único amplificador operacional miniatura de ultra-bajo ruido con una ganancia de 16. El preamplificador y los condensadores de sintonía de bobina, se alojan en un encapsulado de aluminio alimentado por tres pilas en serie tipo AAA (Foto-5). El conjunto va adosado a la bobina.

Este consta de un único amplificador

### 2.2.3- Amplificador

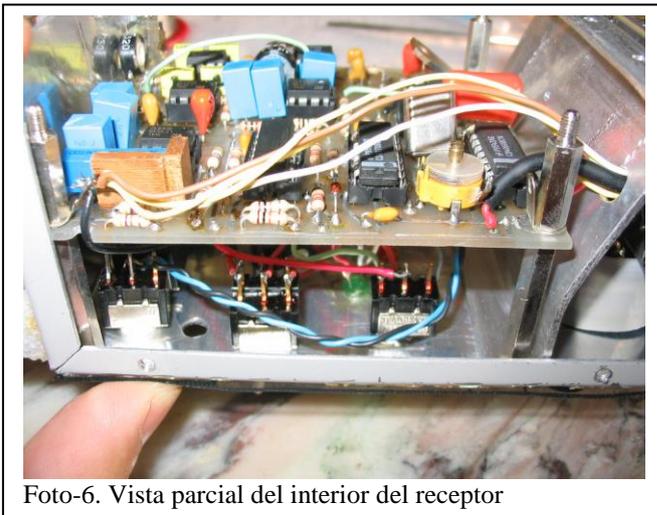


Foto-6. Vista parcial del interior del receptor

El amplificador de bajo ruido es de tres etapas, con ganancia ajustable desde 0,5 hasta 100000 veces y atenuador de X100. Posteriormente al incorporar el preamplificador de bobina la ganancia fue reducida. Posee un ancho de banda de varios KHz y junto con el resto de la electrónica va incorporado en una caja de aluminio desde la que se controlan todas las funciones (Foto-6 y Foto-7).

El indicador de sobrecarga consta de una puerta exclusiva OR (XOR) que activa un diodo LED rojo cuando se produce saturación del amplificador como consecuencia del ruido atmosférico, interferencias de otras fuentes emisoras o exceso de señal procedente del emisor. En este caso se debe bajar la ganancia del amplificador.

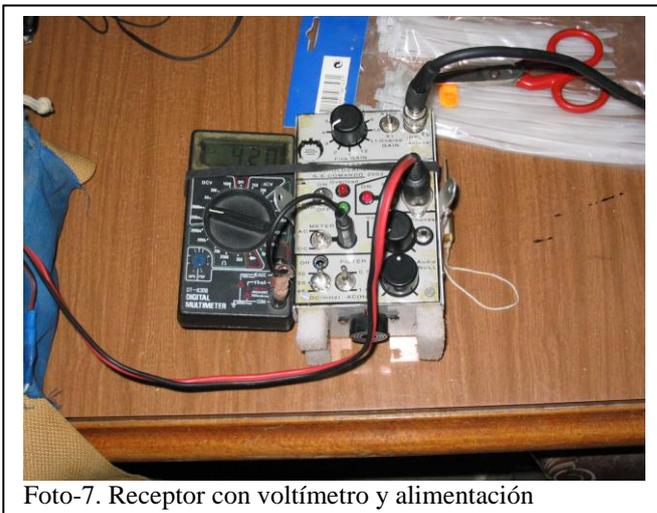


Foto-7. Receptor con voltímetro y alimentación

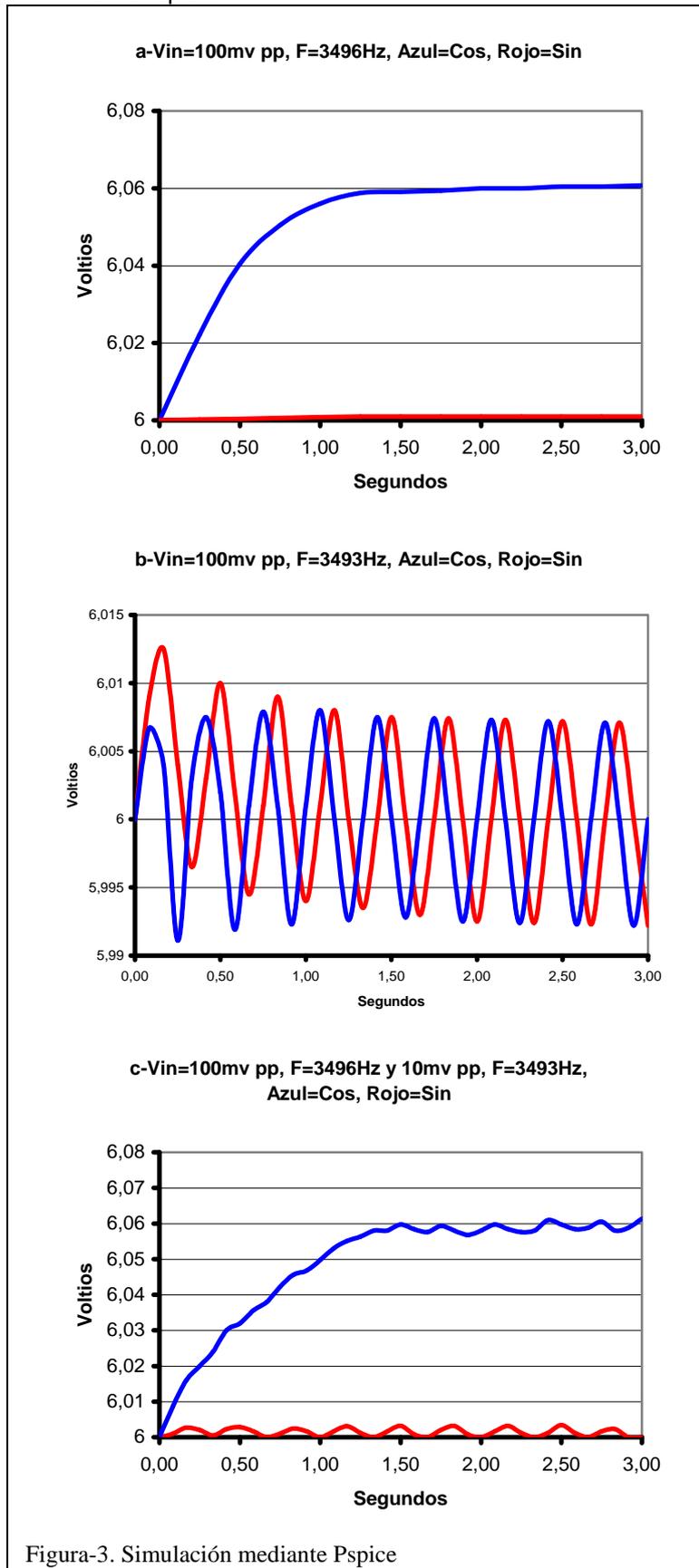
### 2.2.4- Detector de doble cuadratura

El detector de doble cuadratura es la parte electrónica más difícil de comprender y constituye el núcleo fundamental del sistema. Detecta la señal correspondiente a la frecuencia del emisor excluyendo cualquier señal de diferente frecuencia y la acondiciona para ser medida en un voltímetro y oída en auriculares.

(Figura-2)

La señal proveniente del amplificador

llega a la primera etapa que actúa como detector de fase y produce un voltaje en continua proporcional al seno y coseno de la señal de 3496 Hz. Estas señales varían lentamente con el tiempo a no ser que el receptor este acoplado en fase al emisor, opción que se incorporó posteriormente. Cuando una de la señales es cero, la otra es máxima, pero su suma rms es siempre proporcional a la señal de entrada. Estas señales se pasan a través de un filtro pasa bajos de 32 Hz o 1 Hz (posteriormente modificados a 1 Hz y 0,5 Hz) que definen el ancho de banda del receptor.



Las señales se pasan a través de un segundo detector de fase que convierte las señales continuas en nuevas ondas cuadradas a 437 Hz con amplitudes proporcionales al seno y coseno de la señal original. Son entonces sumadas y pasadas por un filtro pasa banda ajustado a 437 Hz. La señal de salida de 437Hz es por un lado amplificada y oída en los auriculares y por otro lado llevada a un mVoltímetro de alterna cuya amplitud es proporcional a la señal detectada. Posee el problema de que el detector de doble cuadratura tiene una ligera deriva (propia del diseño) que hace que las señales fluctúen alrededor de 1 deciBelio (10-15% de la señal), lo que es molesto para las medidas y exige promediar. Además, es difícil utilizar filtros de banda más estrecha que eliminen más las interferencias. Esta señal es la que se utilizó en el primer diseño simplificado pero no es necesaria con el diseño final. De hecho la electrónica desde el segundo detector de fase hasta los auriculares puede ser eliminada ya que la señal utilizada se toma de la salida coseno del primer detector de fase en el diseño final. Todo el proceso anterior va sincronizado y controlado por un oscilador local con cristal de cuarzo. El bucle de acoplamiento de fase (Phase-Locked Loop, PLL) que se incorporó posteriormente, impide la deriva de la señal seno y

Figura-3. Simulación mediante Pspice

coseno de salida del primer detector de fase modificando ligeramente la frecuencia del receptor para acoplarla de manera exacta a la del emisor. De esta forma la señal seno permanece prácticamente a cero mientras que la señal coseno es máxima. Esta última es llevada a un mVoltímetro de corriente continua para su lectura. Este voltímetro incorpora filtros adicionales de 0,03 Hz que aumentan considerablemente la selectividad del sistema frente a señales de otras frecuencias.

En la figura-3 se tiene una simulación de las señales seno y coseno presentes a la salida del primer detector de fase con señales de entrada de 3496 Hz (frecuencia de emisor), 3493 Hz (3 Hz de diferencia de una supuesta interferencia) y de la suma de ambas (proporción relativa de señales 1/10) con el filtro de 32 Hz. Se puede observar (Figura-3a) que a 3496 Hz (señal en fase) la señal seno permanece prácticamente a cero (los 6 Voltios del gráfico corresponde al cero de referencia), mientras que la señal coseno aumenta su valor hasta estabilizarse al cabo de unos 3 segundos. Sin embargo (Figura-3b) con 3 Hz de desfase (señal de 3493 Hz) tanto la señal seno como la coseno oscilan con el tiempo en torno a cero Voltios sin llegar nunca a estabilizarse ni alcanzar la intensidad de la señal en fase. Finalmente (Figura-3c) la suma de una señal en fase con una supuesta interferencia con un 10% de la intensidad de la señal deseada producen una señal coseno continua con una pequeña ondulación residual al cabo de 3 segundos. Hay que hacer notar que con los filtros de 0,5 Hz y los de 0,03 Hz se consigue una mayor selectividad discriminándose señales interferentes que difieren en apenas 0,2 Hz de la señal del emisor. En este caso el tiempo necesario para que la señal coseno se estabilice aumenta hasta casi un minuto.

Junto con la incorporación del amplificador PLL se añadió un indicador de bloqueo de fase y alarma que mediante una señal sonora y una indicación visual te avisa de la detección de la señal correcta. Esto permite una mayor tranquilidad durante las esperas de la recepción de señal, al no ser necesario estar continuamente observando el indicador de señal. Este indicador compara las señales seno y coseno de manera continua y se dispara en el momento en que detecta una señal superior a unos mVoltios. Posee un ciclo de histéresis de algunos segundos para evitar continuas falsas alarmas.

### **2.2.5- Filtro pasa banda**

El filtro pasa-banda consiste en dos filtros con topología MFBPF (Multiple Feedback Bandpass Filter) acoplados en cascada y con la frecuencia central de 437 Hz. Transforman la onda compleja formada por varias señales cuadradas superpuestas provenientes del sumador algebraico en una señal senoidal de 437 Hz de amplitud proporcional a la señal captada por la bobina. Esta señal es leída en un mVoltímetro de corriente continua y también llevada al amplificador de audio para su escucha.

### **2.2.6- Amplificador de audio**

Construido entorno a un único amplificador operacional especializado para audio, el LM 386. Posee volumen regulable de sonido y permite la escucha de la señal en cualquier auricular de 8 a 32 ohmios.

## **3- MEDICIONES SOBRE EL TERRENO**

Es necesario realizar dos equipos. El primero constituido por un mínimo de dos personas, se encarga de entrar en la cavidad con la bobina emisora y su correspondiente electrónica. Su misión es colocar el emisor en los puntos elegidos y aproximadamente a la hora establecida. La bobina se debe de situar perfectamente horizontal para lo cual cuenta la bobina con dos niveles de burbuja perpendiculares entre si que permiten con la ayuda de las tres patas ajustables conseguir la horizontalidad en apenas un minuto. Posteriormente se conecta la batería y se verifica mediante la visualización de un diodo LED rojo el perfecto funcionamiento del emisor. Trascurre una hora se desconecta el sistema y se desplaza hasta el siguiente punto a localizar. Debido a la larga espera es aconsejable en cavidades frías llevar manta térmica o similar.

El segundo de los equipos trabaja en superficie y al contrario que el primer equipo este debe de protegerse de las inclemencias meteorológicas, sobre todo del sol si se trabaja en verano. Este grupo apenas dispone de tiempos libres, salvo en los pasos de un punto a otro que como es lógico se realizan de manera más rápida en superficie. Debe estar constituido por un mínimo de tres personas. Una de ellas se encarga exclusivamente del manejo de la electrónica de recepción, que es la parte más compleja. También maneja o ayuda en el manejo de la bobina receptora. Una segunda persona toma todas las anotaciones que le indica el primero y las de

GPS y topográficas que realizan el mismo y el tercero de los componentes. El tercero maneja esencialmente la bobina receptora durante las medidas de localización del punto cero (ground zero) y de profundidad y ayuda en los datos topográficos del terreno. Es aconsejable en terrenos con mucha vegetación llevar alguna herramienta para clarear la zona.

El equipo de superficie tiene dos misiones fundamentales: determinar el punto cero (ground zero) en superficie, punto situado justo en la vertical del emisor y determinar la profundidad del emisor.

### 3.1- Determinación del punto cero

Con ayuda del GPS o los planos localiza el equipo las proximidades del supuesto punto cero y se sitúa, si es posible, en una zona resguardada a algunas decenas de metros. Conecta el equipo y realiza el ajuste del cero de señal con la bobina desconectada, y tras conectar la bobina sitúa esta tumbada en el suelo. Espera a que la señal de alarma de detección de señal comience a zumbar, indicación de que ya ha sido conectado el emisor. A partir de este momento y durante 30 a 60 minutos que cuesta realizar el total de las medidas se ha acabado la tranquilidad.

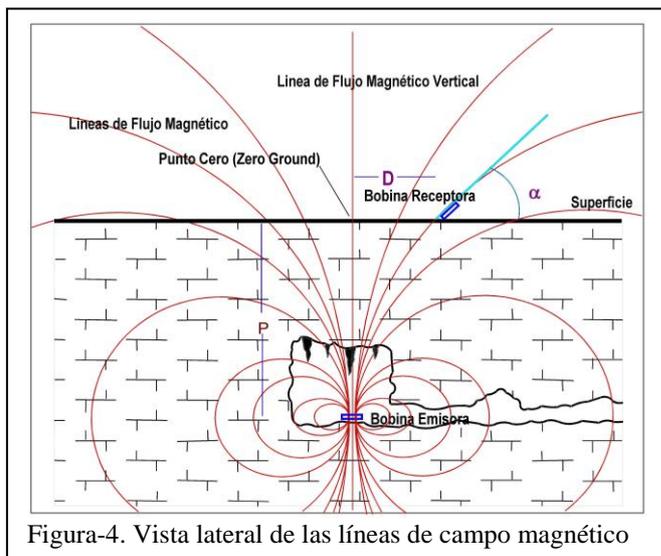


Figura-4. Vista lateral de las líneas de campo magnético

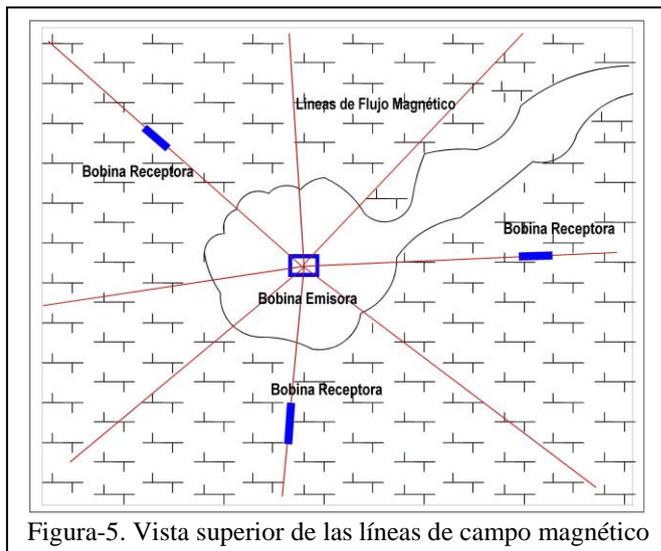


Figura-5. Vista superior de las líneas de campo magnético

Se apaga la alarma de detección de señal y se inician las medidas desde ese punto. Para ello se coloca la bobina en posición vertical y se va girando sobre su eje lentamente (ver Figura 4 y Figura 5) hasta localizar el nulo de señal (cero o lectura mínima en el mVoltímetro). En este momento la bobina está alineada con las líneas de campo magnético procedentes del emisor. El punto cero estará en cualquiera de las direcciones a la que apunta la alineación de la bobina. Para establecer cual de las direcciones es correcta, el equipo se traslada unas decenas de metros en perpendicular a la bobina y realiza una nueva medida de dirección. El punto de convergencia de ambas direcciones es el punto cero. Para asegurarse se realiza una tercera medida. La forma en que habitualmente trabajamos nosotros es dejar uno de los componentes del equipo en el primer punto y mirando en la dirección que apunta la bobina. El segundo componente hace lo mismo en el segundo punto. Finalmente el tercer componente que está en ese momento en el tercer punto manejando la bobina y electrónica indica a los otros dos miembros que avancen en la dirección correcta hasta que se juntan o quedan próximos. Con ayuda de la tercera dirección se localiza normalmente un triángulo en donde se encuentra el punto cero.

Se procede ahora a la localización precisa del punto cero aprovechando el hecho de en dicho punto las líneas de campo magnético salen en posición vertical lo que produce una señal mínima (un nulo) sobre la bobina situada verticalmente. Se coloca la bobina vertical en cualquier punto del triángulo anterior. Se inclina la bobina a derecha o izquierda hasta encontrar un nulo. El punto cero estará en la dirección opuesta a la inclinación realizada. Se desplaza la bobina en la dirección adecuada y se repite el proceso hasta que el nulo se

encuentre en la posición vertical de la bobina, se marca el punto. Para asegurarse se repite el proceso partiendo del punto anterior y girando la bobina vertical 90 grados sobre su eje. Se hace lo mismo con 180 y 270 grados (Foto-8). De esta forma se compensan las posibles imperfecciones de la bobina y la posible anisotropía del terreno. Al final se tendrán cuatro puntos que delimitan un cuadrado, en el centro está el punto cero. Todo el proceso de localización del punto cero es aconsejable hacerlo con los filtros de menor selectividad ya que el sistema responde de manera más rápida a los movimientos de la bobina.



Foto-8. Localización precisa del punto cero

Medidas realizadas por nosotros a unos 90 metros de profundidad en la cueva de Los Chorros sitúan el punto cero en un cuadrado de solo 10 cm. de lado. Incluso a profundidades de 200 metros y no siendo muy meticolosos en el ajuste del punto cero el cuadrado nunca ha superado el metro de lado.

Todo el proceso se puede llevar a cabo en menos de 15 minutos, siempre que el terreno lo permita y la situación original no este muy alejada del punto cero. No obstante por errores de situación de la bobina emisora o de localización inicial del punto cero, algunas veces nos hemos encontrado a más de 400 metros de

distancia de dicho punto y cuando la señal se ha empezado a detectar se ha podido localizar con éxito el mencionado punto.

### 3.2- Determinación de la profundidad

Para la determinación de la profundidad se pueden utilizar tres métodos diferentes: Intensidad absoluta del campo magnético, Radiométrico, o por Angulo de campo magnético. En este caso se utilizan los filtros más estrechos que aunque más lentos en respuesta permiten discriminar con más facilidad cualquier señal parásita indeseada.

#### 3.2.1- Intensidad absoluta del campo magnético (Absolute Field Strength)

Con este método se mide el voltaje de la señal en el punto cero con la bobina puesta horizontalmente. Con este valor ( $V$ ) se calcula, mediante la fórmula-1, la profundidad deseada  $P$ .  $D_{cal}$  y  $V_{cal}$  son la distancia y el voltaje medidos durante medidas de calibración en superficie realizadas previamente.

La principal ventaja es que solo se realiza una medida en el punto cero, no teniendo que desplazarse más por el terreno. Los inconvenientes son que se necesita un receptor muy estable, cosa que no cumple el receptor simplificado inicial y sobre todo que se debe calibrar en superficie con lo cual se asume que la roca donde se realiza la medida final es idéntica a la de la calibración, lo cual no es cierto.

Este método no ha sido usado por nosotros.

#### 3.2.2- Radiométrico o de gradiente de campo

Consiste en la medida de la señal en el punto cero y también a una distancia conocida por encima de este, siempre con la bobina receptora horizontal (Foto-9). Usando la fórmula-2, se calcula la profundidad  $P$ .  $H$  es la diferencia de altura entre las dos medidas y  $V_1$ ,  $V_2$  los voltajes medidos en el punto cero y por encima del punto cero respectivamente. Para ello se debe mantener durante la segunda medida la bobina en posición horizontal y a unos cuantos metros por encima del punto cero con ayuda de algún alargador. Esto resulta complicado y solo útil con profundidades reducidas en donde la distancia a elevar la bobina sean corta para que la diferencia entre  $V_1$  y  $V_2$  sean significativas. Además se asume que la señal en el aire por encima del punto cero y la señal en la roca responden a la misma ley cúbica ignorando cualquier efecto de conductividad de la roca.

A nosotros los resultados iniciales con el sistema simplificado mostraron bastante error y se descartó este método en posteriores medidas.



Foto-9. Método de gradiente de campo

### 3.2.3- Angulo de campo magnético

Es el método más empleado por nosotros. Se basa en la medida del ángulo de salida  $\alpha$  de las líneas del campo magnético a una determinada distancia D del punto cero (Figura-4). Requiere algo más de tiempo que cualquiera de los métodos anteriores ya que exige un desplazamiento por el terreno, cosa que según la orografía puede resultar complicado o al menos molesto. Además precisa de medidas y cálculos topográficos adicionales.

Se localizan dos o preferiblemente tres puntos en direcciones diferentes y a una distancia del punto cero de aproximadamente el 50 o 60% de la profundidad estimada (no siempre es posible). Con esta distancia el ángulo de salida de las líneas de campo magnético esta sobre los  $45^\circ$ , lo que minimiza errores de medida. A veces, por dificultades del terreno, dos de los puntos están en la misma dirección pero a distancias diferentes. En cada uno de estos puntos se determina la profundidad P mediante el ángulo de salida de la

señal  $\alpha$  y la distancia D con el punto cero (Formula-3). Se calcula después un promedio con los dos o tres valores obtenidos. Para determinar el ángulo  $\alpha$  se sitúa inicialmente la bobina receptora en posición vertical y apuntando por una de sus caras laterales (posición de máximo flujo magnético) al punto cero. Se inclina lentamente la bobina en dirección opuesta al punto

cero hasta encontrar el nulo de señal. El ángulo que forma la bobina con el suelo, es el ángulo  $\alpha$ . Esto exige que la bobina lleve acoplado un transportador de ángulos adecuado. Se puede evitar este inconveniente, tal como hacemos nosotros, midiendo la señal con la bobina en posición vertical y apuntando lateralmente al punto cero ( $V_V$  de Fórmula-4) y también con la bobina perfectamente horizontal ( $V_H$  de Fórmula-4). Con la fórmula-4 se calcula el ángulo de salida  $\alpha$ . Una combinación de la fórmula-3 y la fórmula-4 es la fórmula-5 que facilita los cálculos. Hay que tener presentes que en la fórmula-3 y la fórmula-5 la distancia D entre el punto en cuestión y el punto cero es la distancia proyectada y no la medida ( $D_m$  de fórmulas-6), salvo que ambos puntos estén a la misma altura, cosa bastante improbable. Esto requiere medir la distancia real y el ángulo  $\beta$  entre ambos puntos y mediante las fórmulas-6 determinar la distancia proyectada D y la

$$P = D \cos \alpha \cdot \sqrt[3]{V_{cal}/V}$$

Fórmula-1

$$P = \frac{H}{\left(\sqrt[3]{V_1/V_2}\right) - 1}$$

Fórmula-2

$$P = \frac{2D}{\sqrt{(8+9\tan^2\alpha)} - 3\tan\alpha}$$

Fórmula-3

$$\alpha = \arctan(V_H/V_V)$$

Fórmula-4

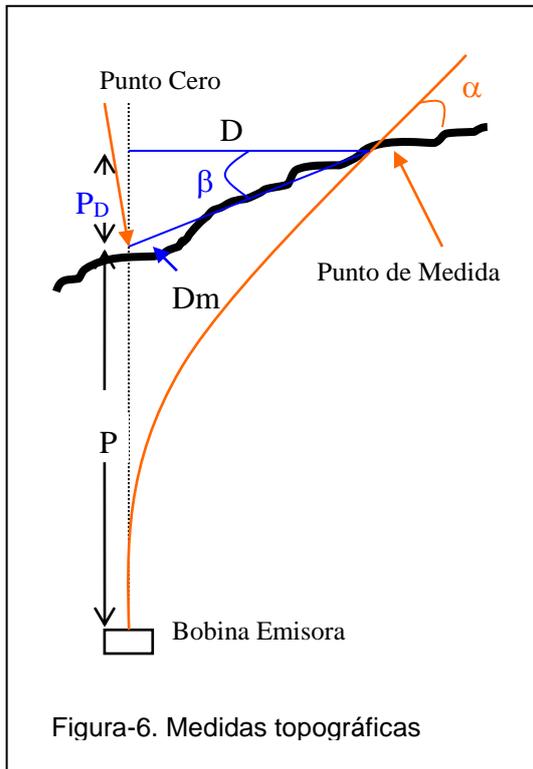
$$P = \frac{2D}{\sqrt{(8+9[V_H/V_V]^2)} - 3(V_H/V_V)}$$

Fórmula-5

$$D = D_m \cdot \sin \beta, \quad P_d = D_m \cdot \cos \beta$$

Fórmulas-6

diferencia de altura  $P_D$  que habrá que sumar o restar a la profundidad calculada según que el punto de medida esté por debajo o por encima, respectivamente, del punto cero (Figura-6).



#### 4- ERRORES DURANTE LA RADIOLOCALIZACIÓN.

Básicamente podemos dividirlos en dos tipos de errores, los debidos al propio radiolocalizador y los debidos a la geología del terreno.

##### 4.1- Errores del radiolocalizador

###### 4.1.1- Errores de emisión

Prácticamente el único error es debido a la incorrecta nivelación horizontal de la bobina emisora. Con una desviación de  $1^\circ$  de la horizontal se produce un error de localización del punto cero de 0,5 metros a una profundidad de 90 metros y afecta también en mayor o menor cuantía a la determinación de la profundidad por cualquiera de los métodos antes mencionados. Si los niveles de burbuja de la bobina están correctamente situados el posible error de nivelación es considerablemente inferior a  $1^\circ$  y por tanto despreciable.

###### 4.1.2- Errores de recepción

Si la electrónica está correctamente construida y con los componentes adecuados se puede considerar nula su influencia en los errores.

La mala construcción de la bobina receptora y sus niveles de burbuja correspondientes si puede contribuir a producir los errores. Cuando se busca el punto cero y se realiza su localización en el punto central, resultante de la intersección de los cuatro puntos determinados por la rotación de la bobina en ángulos de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  y  $270^\circ$ , los errores se compensan. Sin embargo, en la técnica de medida de profundidad mediante el ángulo de salida de las líneas de campo magnético, el error cometido con una variación de  $1^\circ$  oscila entre 2 a 4% con ángulos de salida de  $20^\circ$  a  $65^\circ$  respectivamente. Es un error fácil de cometer tanto con el uso del transportador de ángulos (por la dificultad de encontrar un nulo perfectamente definido), como por la medida de la componente horizontal y vertical si esta se realiza, como es habitual, sin la ayuda de soportes específicos para la bobina. Esto último se compensa en parte realizando varias medidas y promediando. A esto hay que añadir los posibles errores de topografía en terreno inclinado.

Hay un error adicional cuando la bobina emisora y receptora están muy próximas (muy poca profundidad) debido a la distorsión de las líneas magnéticas al no ser el emisor una fuente puntual. Depende esencialmente del tamaño de la bobina emisora y se puede considerar que deja de ser apreciable cuando la profundidad es superior a cinco veces el diámetro de la bobina emisora. En nuestro caso esta profundidad límite sería de unos 3 metros.

##### 4.2- Errores debidos a la geología del terreno

###### 4.2.1- Presencia de rocas magnéticas

La presencia en el terreno de algunos minerales magnéticos, por ejemplo algunos derivados del hierro, causa la distorsión de las líneas de campo magnético. Esto produce una alteración de todas las medidas realizadas. No se puede hacer absolutamente nada para remediarlo, excepto evitar las medidas en dichos terrenos.

###### 4.2.2- Anisotropía

La roca caliza presenta anisotropía o falta de homogeneidad en todas las direcciones. Es producida por la presencia de estratos de diferente composición, por las grietas (fallas, diaclasas...) y por la mayor o menor presencia de agua.

La anisotropía produce una variación en la conductividad de la roca que origina medidas diferentes según la dirección en que se tomen. La toma de medidas en diferentes direcciones puede promediar este fenómeno.

#### **4.2.3- Conductividad de la roca. Campo magnético secundario**

Las rocas se comportan como conductores frente a los campos magnéticos. Un campo magnético atravesando la roca induce las denominadas corrientes de Eddy. Estas originan un campo magnético secundario que está desfasado con el campo magnético primario (el originado por la bobina emisora). El resultado es conocido como polarización elíptica que dificulta la obtención de nulos precisos. El problema se agrava con la distancia entre el emisor y el receptor y es mucho más marcado en las medidas de la profundidad que en las del punto cero.

#### **4.2.4- La zona de transición**

El campo magnético procedente de la bobina emisora puede ser dividido en dos regiones. El campo próximo o zona de inducción que predomina a distancias inferiores a la mitad de la longitud de onda del emisor y el campo lejano o zona de radiación a distancias superiores a esta. Entre ambos extremos está la zona de transición en donde se superponen campos. En la zona de inducción las líneas de campo magnético responden a las usuales de una bobina magnética y por tanto se pueden usar las fórmulas 1-5. En la zona de radiación las líneas del campo magnético siguen trayectorias circulares que no intersectan en el origen, siendo una zona no utilizable. Por supuesto la zona de transición tampoco es de utilidad práctica.

Para la frecuencia utilizada (3496 Hz) y en el vacío (o el aire) la longitud de onda, que es el cociente entre la velocidad de la onda en el vacío y su frecuencia es de unos 80 kilómetros. Pero la velocidad de la onda en la roca, que depende de su conductividad y de su susceptibilidad magnética, es muchísimo más baja. Esto se traduce en que la zona de utilidad se reduce a unas decenas o centenares de metros, dependiendo de las características de la roca. Es lo que se suele llamar profundidad de la piel o "skin-depth".

A todos los efectos anteriormente mencionados hay que añadir las posibles interferencias por fuentes emisoras de radiaciones electromagnéticas próximas, como pueden ser líneas de alta tensión o tormentas.

El conjunto de los factores mencionados origina que normalmente el error cometido hasta profundidades de unos 60 metros sea muy bajo. Del orden de unos centímetros en la localización del punto cero y de 1 a 2 metros en la profundidad. Pero conforme aumentamos la profundidad el error aumenta considerablemente sobre todo en la medida de esta última. Por ejemplo a unos 200 metros de profundidad el error puede ser de un 15%.

Se ha observado (ver nota-3 al final del artículo) que la medida de la profundidad por los métodos de gradiente de campo o por el de ángulo de campo magnético suele dar valores inferiores a los reales, mientras que el método de intensidad absoluta del campo magnético refleja valores superiores. Curiosamente un promedio entre cualquiera de los primeros y este último conduce a valores muy próximos al real.

### **5- CONCLUSIONES**

La versión simplificada del radiolocalizador nos permitió medir con facilidad en la cueva de Los Chorros profundidades superiores a 100 metros, pero empezaba a presentar problemas de interferencias y estabilidad cuando la profundidad estaba próxima o superaba los 200 metros. La localización del punto cero no presentaba excesivas dificultades.

La versión completa, sobre todo con la incorporación del preamplificador de antena y los nuevos filtros, nos permitió un aumento considerable de la estabilidad y rechazo de interferencias consiguiéndose resultados muy fiables a profundidades superiores a los 200 metros. El sistema no ha sido probado a más de 250 metros de profundidad, pero los ensayos realizados indican que se puede detectar la señal a más de 1000 metros de profundidad y localizar el punto cero. Previsiblemente, con la versión actual, se podrían realizar medidas de profundidad razonables hasta unos 400 metros.

### **6- NOTAS Y BIBLIOGRAFÍA**

1) <http://radiolocation.tripod.com/> y referencias citadas.

2) Los condensadores reales no tienen un comportamiento puramente capacitativo. Por el contrario son el resultado de la combinación de una componente capacitativa, más una resistiva y una inductiva. Incluso algunos tipos de condensadores, por ejemplo ciertos cerámicos, alteran notablemente el valor de la

capacidad con la temperatura y la tensión aplicada. Para un conocimiento más detallado ver <http://www.electronicafacil.net/tutoriales/tutorial153.html> .

3) a) The D-Q Beacon Receiver. Brian Pease. Speleonic 21, vol VI nº 1 March 1997, pag 10.

b) Determining depth by radio-location: An extreme case. Brian Pease. BCRA/CREG Journal 27, March 1997.

c) Radiolocation using field gradient techniques. David Gibson. BCRA Cave Surveying Group, Compass Points 22, December 1998.

#### Pies de fotos y figuras

Foto-1. Vista del interior del emisor

Foto-2. Bobina emisora

Figura-1. Diagrama de bloques del receptor

Figura-2. Diagrama de bloques del detector de doble cuadratura y ampliaciones

Foto-3. Zona central de la bobina receptora

Foto-4. Zona lateral de la bobina receptora

Foto-5. Preamplificador y caja

Foto-6. Vista parcial del interior del receptor

Foto-7. Receptor con voltímetro y alimentación

Figura-3. Simulación mediante Pspice

Figura-4. Vista lateral de las líneas de campo magnético

Figura-5. Vista superior de las líneas de campo magnético

Foto-8. Localización precisa del punto cero

Foto-9. Método de gradiente de campo

Figura-6. Medidas topográficas