

MEMORIA GENERAL 2017



Grupo de Espeleología “ Comando “.

INDICE:

Introducción.

Historia resumida del uso del radiolocalizador.

Diseño y uso de la radiolocalización en la exploración espeleológica.

INTRODUCCION:

Nuestro grupo se ha caracterizado desde que existe, el hacer una espeleo de exploración y localización de nuevas cavidades aunque para ello tengamos que ser picapedreros con pañuelo de 4 nudos en la cabeza, metafóricamente hablando.

En el proceso de localización hemos utilizado desde la información que nos han dado los paisanos del lugar, documentación geologica, fotografía aérea de la zona, como el rastreo miticoloso de la superficie siguiendo la fracturación del terreno como la observación de sus depresiones y otros accidentes tectónicos y claro esta que a base de mucha constancia al final se consiguen buenos resultados; aunque no todas las veces suena la flauta. Tambien se han utilizado los conocimientos de un zahori miembro de nuestro grupo y por ultimo echamos mano a elementos electrónicos de radiolocalización o radiogoniometría, a través de otro miembro,(que gracias a las muchas horas que dedico a diseñar los aparatos y mejorarlos), para poder localizar bocas partiendo desde el interior de cavidades.

Sin olvidar que para esa actividad y localización, es imprescindible el espeleólogo/a por su experiencia y conocimiento del medio.

Esta forma de localizar cavidades las hemos utilizado en varios sectores de la Cueva de los Chorros, en distintas épocas del año del 2003 y años posteriores, al igual que en la AC-12 para localizar la AC-13, la AC-14 y la AC-18. Estas 2 cavidades ultimas, tenemos mucho trabajo de desostrucción para acceder y en ello estamos.

En el proceso de desostrucción, utilizamos desde las herramientas manuales normales como todas las que las leyes nos permiten.



Trasmisor.

Historia resumida del inicio y continuación de los distintos trabajos realizados con el radiolocalizador:

Todo empezó a razón de ser nuestro grupo, miembro de la asociación espeleológica EXTPOCIEN y aprovechando que la FCM. Iva a organizar en el Calar del Mundo el VII Encuentro de espeleología los días del 30 de Mayo al 2 de junio de 2002. Las actividades divididas en 2 parte, la primera, mostrar con charlas, conferencias y proyecciones en el pueblo de Riopar, el trabajo espeleológico que se esta realizando en la zona y la segunda parte activa haciendo entradas por la surgencia de la cueva de los Chorros y ya en el Calar, acceder a uno de los sectores entre sifones de la cueva, por Espeleuka, para la exploración de varios sifones, hacer medidas del PH y conductividad del agua y tomas de temperaturas en varios puntos para completar los estudios científicos de la zona. Tambien había contempladas varias actividades que tenían previsto realizar la asociación en la sima Hinnen I, (entre ellas trabajar con un equipo de radiolocalizador).

El equipo del radiolocalizador tenia como tarea el situar en superficie, el techo de un pozo ascendente de unos 25 mts. existente en la sala de los Bloques, el trabajo dio buenos resultados; aunque algo imprecisos, por lo que la gente del “Comando” que ya llevaba ideas con este método y que participo en ese grupo de trabajo, nos hizo reflexionar de que había que diseñar el transmisor como el receptor para que tuviera mas potencia, un transporte mas comodo y nos diera mayor exactitud y por lo tanto menor error a la hora de localizar bocas desde dentro de cavidades con grandes techos o pozos ascendentes sin abertura en el exterior. El primer diseño que se hizo de radiolocalizador nos silvio como ya se menciona anteriormente en la cueva de Los Chorros; aunque el grueso de los paquetes de roca entre techo y superficie exterior eran muy grandes sin indicios de acceso posibles, debido a la gran cantidad de galerías por donde se desarrolla la cavidad. Tambien lo utilizamos y nos ayudo en parte para a través de la AC-12 localizar la AC-13. Con el segundo diseño mas ergonómico y adaptado al punto mas alto de la escalada y que se tenia que colocar en suspensión.

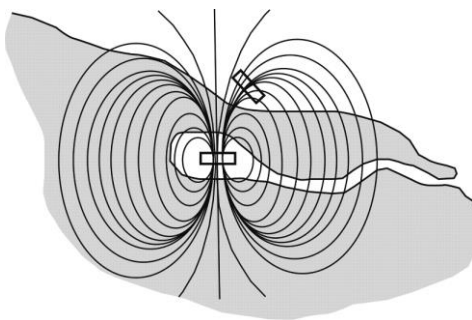


Receptor.

USO DE LA RADIOLOCALIZACIÓN EN LA EXPLORACIÓN DE CAVIDADES

1- INTRODUCCIÓN.

La radiolocalización es el proceso de localizar un punto emisor mediante el uso de ondas de radio. Dentro de esta técnica se encuentra la radiogoniometría que consiste en la localización del 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.
- La búsqueda de aportes y surgencias.
- La búsqueda de nuevas bocas de acceso a la cavidad.
- En general la proyección de cualquier punto del interior de la cavidad en la superficie exterior y el conocimiento de la profundidad a que se encuentra.

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).

2-DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE RADIOLOCALIZACIÓN.

Nuestro grupo de espeleología, 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 requería el uso de un sistema fiable de radiolocalización. Este sistema debía ser capaz de trabajar a profundidades superiores a 200 metros. En el presente trabajo pretendemos dar unos conocimientos generales de los fundamentos, desarrollo, mejoras y uso de un radiolocalizador construido por nosotros que permite superar ampliamente los 200 metros. De hecho, con las últimas mejoras, el receptor es capaz de detectar la señal del emisor situado a más de 2000 metros. Este sistema fue inicialmente construido en una versión simplificada en junio-julio del 2003 y posteriormente sometido a mejoras y ampliaciones. Algunas de estas mejoras y modificaciones han sido realizadas durante el 2017 y se han debido a los recientes trabajos realizados en la zona de Barx (Valencia).

El modelo inicial está 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

El emisor consta de una parte electrónica alimentada con batería y la bobina emisora. Se han utilizado hasta el momento dos tipos completamente diferentes de bobinas.

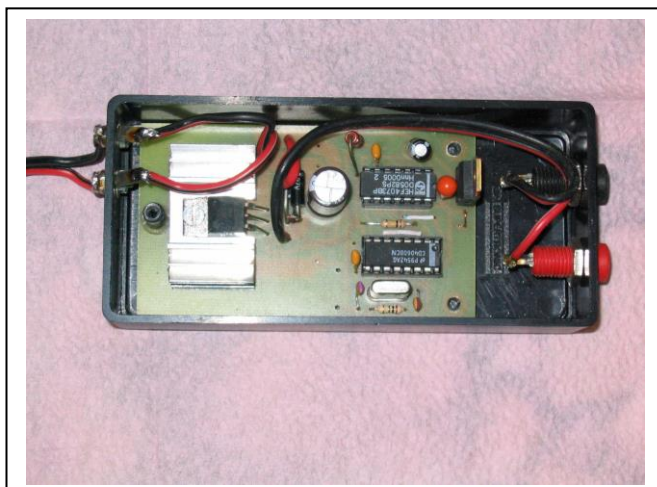


Foto-1. Vista del interior del emisor

2.1.1- Parte electrónica

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 parte electrónica ha funcionado muy bien a lo largo de los años y ha soportado los duros tratos a que ha sido sometida. Prácticamente no ha necesitado cambios ni mejoras sustanciales.

2.1.2- Bobina emisora (inicial)

Esta bobina se diseñó para trabajar a grandes profundidades. 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 (Foto-2). La nivelación es fundamental para la precisión del sistema.



Foto-2. Bobina emisora

Sus características son:
Bobinado de cobre con hilo esmaltado de 2,5 mm de diámetro,

19 vueltas con toma intermedia en la 3ª. Inductancia del bobinado de 498 microHenrios (μH). Condensadores de sintonía de unos 4,2 microFaradios (μF). Ancho de banda 113

Hz. Consumo de 0,53 A. 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).

Ha sido utilizada con éxito en los trabajos de exploración y alzamiento topográfico del sistema de la cueva de Los Chorros en Riopar (Albacete) y más recientemente en el ajuste topográfico del sistema GEC 40. De hecho nos ayudó en la ubicación de la segunda boca de dicho sistema (AC-13)

2.1.3- Bobina emisora miniatura



Foto-3. Bobina emisora miniatura

Durante el año 2017 y durante los trabajos en el sistema GEC 40 (AC-12, AC-13) nos encontramos con una parte nueva de la cavidad. Esta finalizaba en una diaclasa ascendente de más de 50 metros. Los datos topográficos y los indicios encontrados (raíces, tierra similar a la del exterior...) apuntaban a

una posible boca muy cerca del techo de dicha diaclasa. Esta boca se buscó por el exterior, de hecho se encontró una boca parcialmente obstruida en la proximidad del punto indicado por la topografía (AC-14 que luego se verifico que estaba a 5.4 metros desplazada). Tras desobstruir esta boca durante varias jornadas, se decidió que la única posibilidad de saber exactamente donde estaba situada la posible nueva boca y a que

profundidad se encontraba el techo de la diaclasa, era el mediante el uso del radiolocalizador.

Sin embargo la bobina inicial presenta unos cuantos problemas:

- Es demasiado voluminosa para los pasos de cierta dificultad (muy estrechos) que se encuentran en esta parte del sistema.
- La nivelación horizontal es imposible si no se dispone de una base para este propósito. La idea era situarla en el techo de la diaclasa ascendente.
- La señal de esta bobina es excesiva y satura el sistema a no ser que se esté a más de 15-

20 metros. Las previsiones según la topografía eran apenas 2-7 metros de paquete calizo hasta superficie.

Como consecuencia de todo lo anterior se diseñó y construyó una bobina mucho más compacta y manejable (Foto-3 y 4). La bobina, baterías (Ión-litio a 16 voltios) y la parte electrónica (la misma que ya disponíamos)

van en un módulo cilíndrico compacto de PVC de 20x9 cm y pesa unos 700 gramos (Foto-5). Es autonivelante ya que va colgada. Es similar en funcionamiento y ajustes a

la bobina inicial, pero posee una potencia del orden de 150 veces inferior. Sus características son: Bobinado de cobre con hilo esmaltado de 0,5 mm de diámetro, 74 vueltas sin toma intermedia (no se utiliza amplificador clase E). Inductancia del bobinado de unos 540 microHenrios (μH).



Foto-4. Comparación Bobina –bobina miniatura



Foto-5. Bobina miniatura montada con electrónica y baterías

Condensadores de sintonía de 4 microFaradios (μF) de polipropileno (MKP). Consumo unos 800 mA.

2.2- Receptor

El receptor es de una gran complejidad a nivel electrónico y se requieren conocimientos avanzados de electrónica para su construcción y ajuste. La parte electrónica ha sufrido notables cambios a lo largo de los años, los últimos en el 2017.

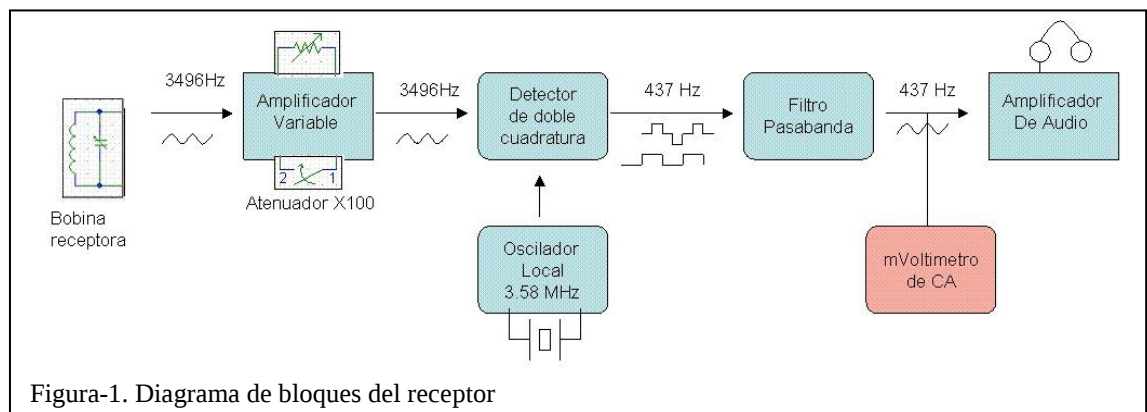


Figura-1. Diagrama de bloques del receptor

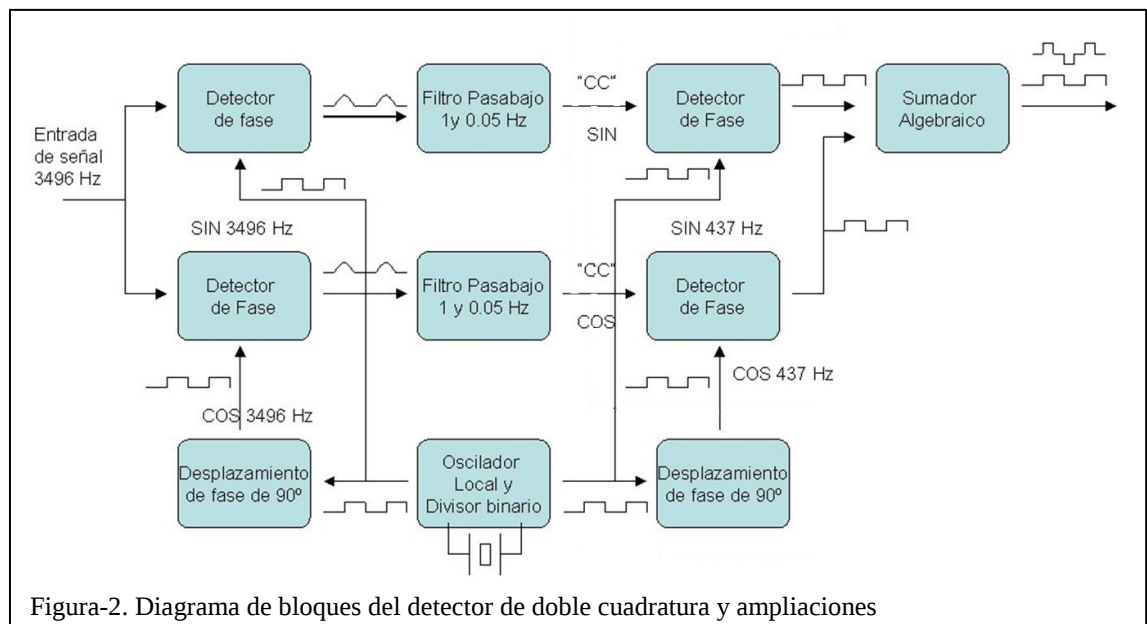


Figura-2. Diagrama de bloques del detector de doble cuadratura y ampliaciones

El diseño de bloques del receptor inicial está representado en la Figura-1 y Figura-2. Consta de una bobina receptora, le sigue un amplificador variable, 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

2.2.1- 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-6 y Foto-7).

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 K Ω . 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.

Dicha bobina ha dado un excelente rendimiento en todas las ocasiones que se ha utilizado y no ha necesitado de cambios salvo lo que se comenta a continuación.

La forma inicial de conectar la bobina receptora al amplificador variable (ver Figura-1) 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 solución fue la incorporación de un preamplificador de bobina. Fue una de las primeras modificaciones del sistema de recepción y solucionó todos estos problemas.

2.2.2- Preamplificador de bobina



Foto-8. Preamplificador y caja

Ni el diseño inicial nuestro ni el diseño de Brian Pease estaban dotados de este preamplificador. Su incorporación constituye una importantísima mejora del sistema.

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-8). El conjunto va adosado a la bobina.

2.2.3- Amplificador

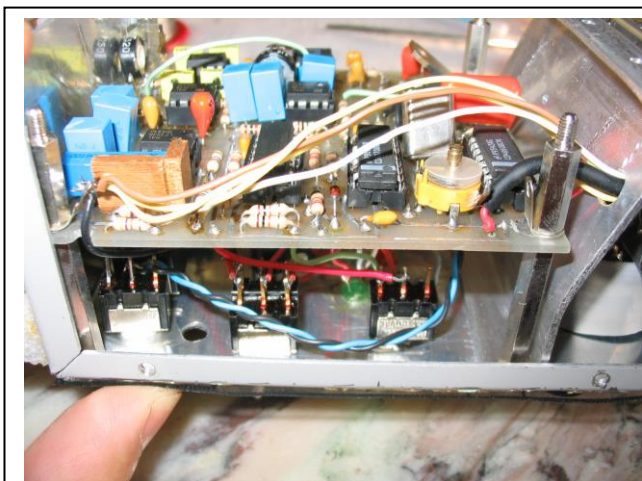


Foto-9. Vista parcial del interior del receptor

El amplificador inicial utilizado es de bajo ruido y consta de tres etapas. Posee un atenuador inicial de entrada (solo utilizado a distancias muy cortas del emisor) de :100. A continuación están las dos etapas iniciales que van acopladas entre sí y permiten un ganancia ajustable desde 0,5 hasta 100000 veces. Por último un

amplificador de ganancia fija de unas 50 veces. 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-9 y Foto-10).

2.2.4- Cambios en el amplificador



Foto-10. Receptor con voltímetro y alimentación

Al incorporar el preamplificador de bobina la ganancia de la última etapa amplificadora fue reducida.

Como consecuencia de la construcción de la bobina miniatura antes mencionada, esta última etapa amplificadora fue de nuevo modificada. De hecho fue sustituida por un filtro analógico

pasa banda centrado a 3496 Hz, con un ancho de banda de unos 30 Hz y una ganancia de 5. De esta forma se reduce notablemente la señal ruido que le llega al posterior detector de cuadratura.

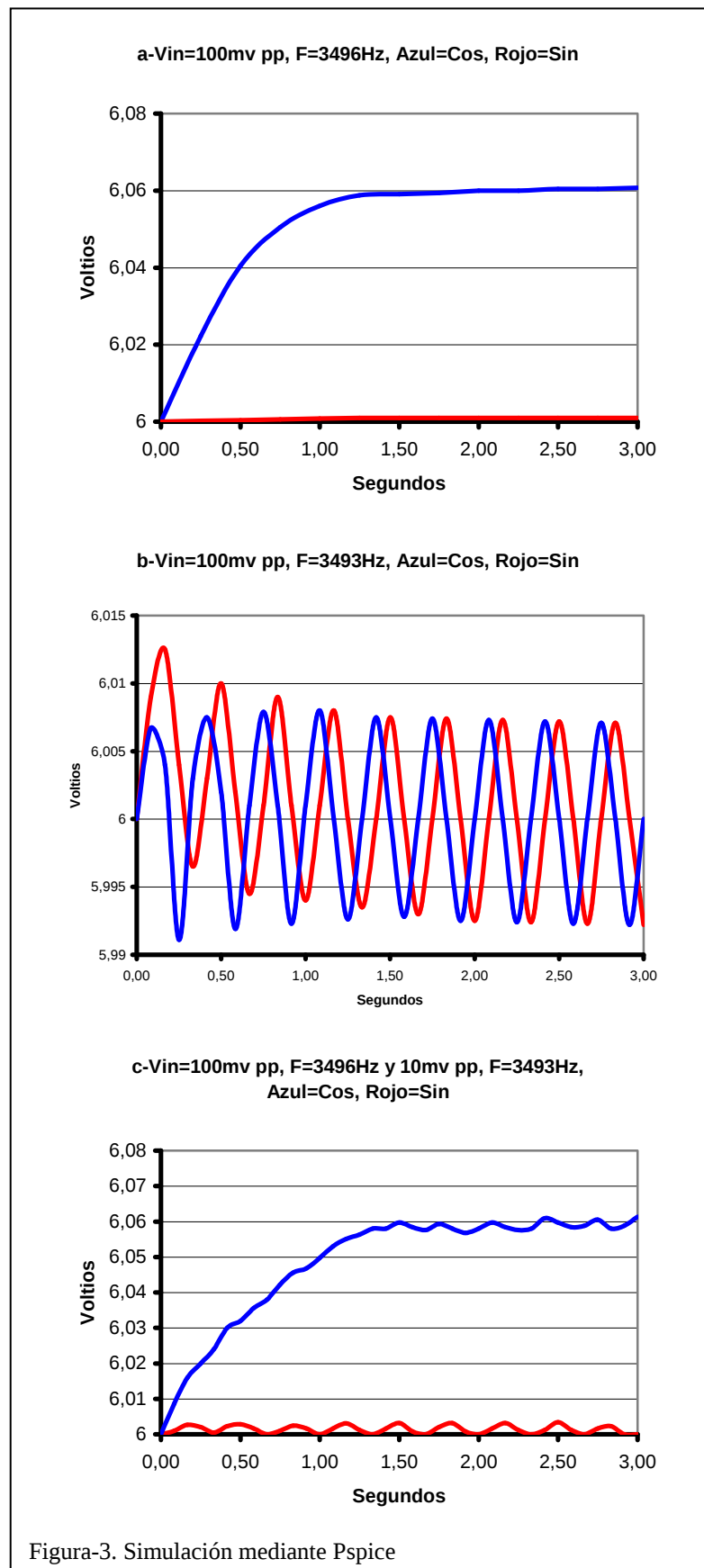
2.2.5- Detector de doble cuadratura

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, con el diseño original, varían lentamente con el tiempo. 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 que definen el ancho de banda del receptor.

Las señales a continuación van a 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 en un sumador algebraico y

pasadas por un filtro pasa banda ajustado a 437 Hz (ver más adelante). 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. Todo el proceso anterior va sincronizado y controlado por un oscilador local con cristal de cuarzo.



Para ver cómo funciona la primera etapa está la figura-3. Es una simulación mediante el programa Pspice 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 el filtro de 1 Hz se consigue una mayor selectividad, discriminándose señales interferentes que difieren en apenas 1 Hz de la señal del emisor. En este caso el tiempo necesario para que la señal coseno se estabilice aumenta a varios segundos.

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 alterna y también llevada al amplificador de audio para su escucha.

2.2.6- Amplificador de audio

Construido en torno 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.

2.2.7- Modificaciones realizadas en el detector de doble cuadratura y etapas posteriores.

Algunos de los cambios más importantes que se han ido realizando han sido:

- Los filtros pasa bajos de 32 Hz y 1 Hz se modificaron a 1 Hz y 0,5 Hz. Hay que hacer notar que con los filtros de 1 Hz y los de 0,5 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 unos 10 segundos.

- El problema de las señales de la primera etapa del sistema de cuadratura que varían lentamente con el tiempo, se solucionaron con el acoplamiento en fase entre el emisor y el receptor. El bucle de acoplamiento de fase (Phase-Locked Loop, PLL) utilizado, impide la deriva de la señal seno y 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 (mucho más asequible que uno de corriente alterna). Este voltímetro incorpora filtros adicionales de 0,03 Hz que aumentan considerablemente la selectividad del sistema frente a señales de otras frecuencias. Con esta mejora la electrónica desde el segundo detector de fase hasta los auriculares ya no es necesaria, ya que la señal utilizada se toma de la salida coseno del primer detector de fase en el diseño modificado, y puede ser eliminada. Esta modificación es tan importante como la incorporación anteriormente mencionada del preamplificador de bobina.

- Un indicador de sobrecarga que 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.

- 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.

Con todas estas modificaciones el diseño de bloques del receptor modificado está representado en la figura-4 y figura-5.

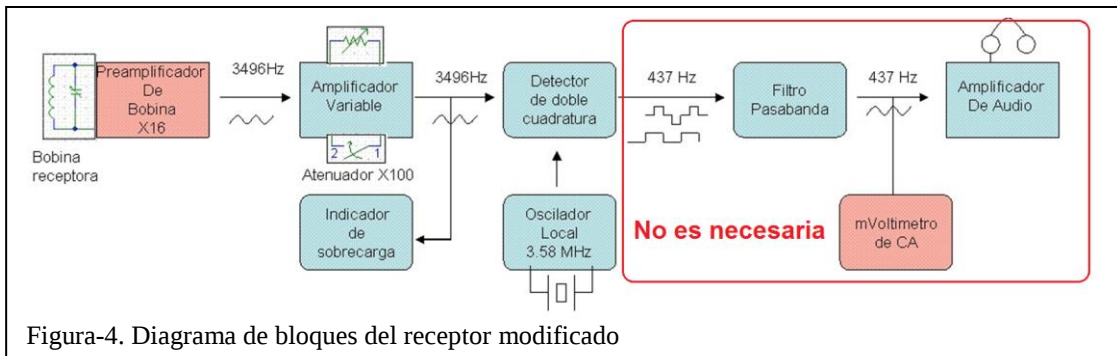


Figura-4. Diagrama de bloques del receptor modificado

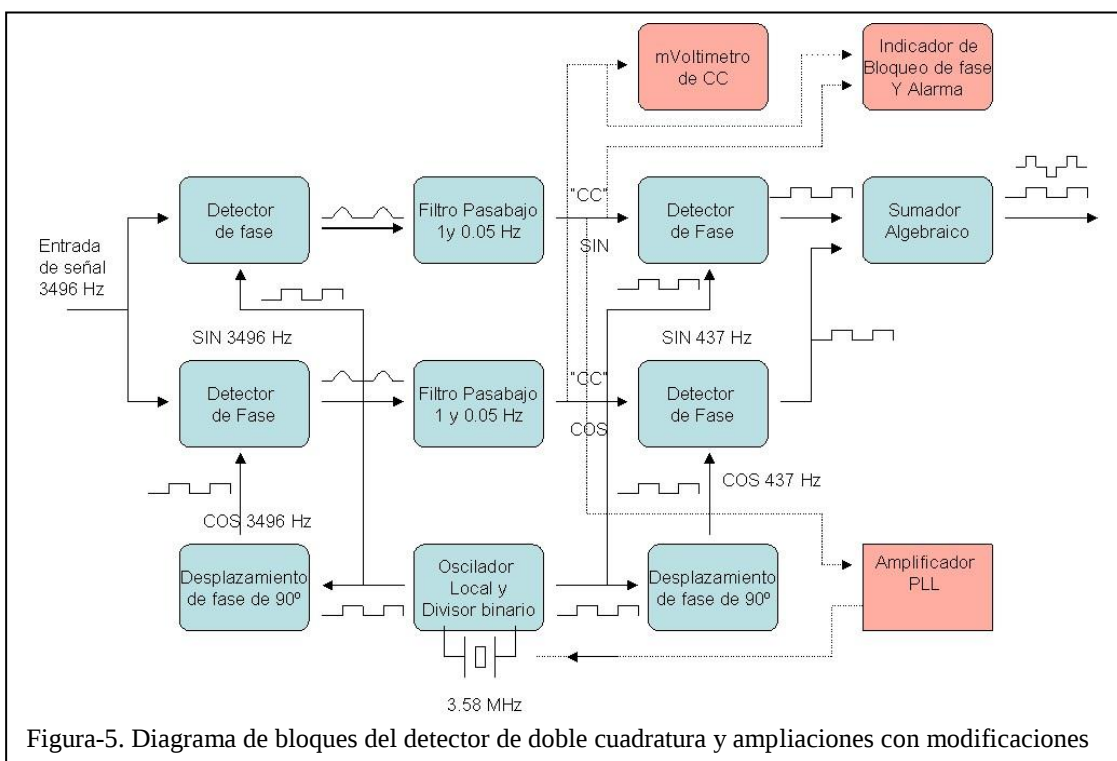


Figura-5. Diagrama de bloques del detector de doble cuadratura y ampliaciones con modificaciones

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. En el caso de la bobina inicial con los dos niveles de burbuja perpendiculares entre sí, 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. En el caso de la bobina miniatura autonivelante, se cuelga de cualquier saliente y se pulsa el interruptor. Normalmente se necesita entre media y una hora para realizar las medidas en el exterior.

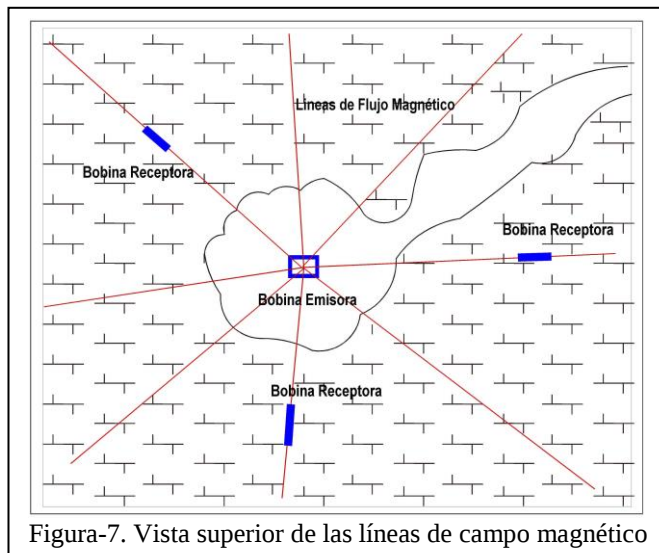
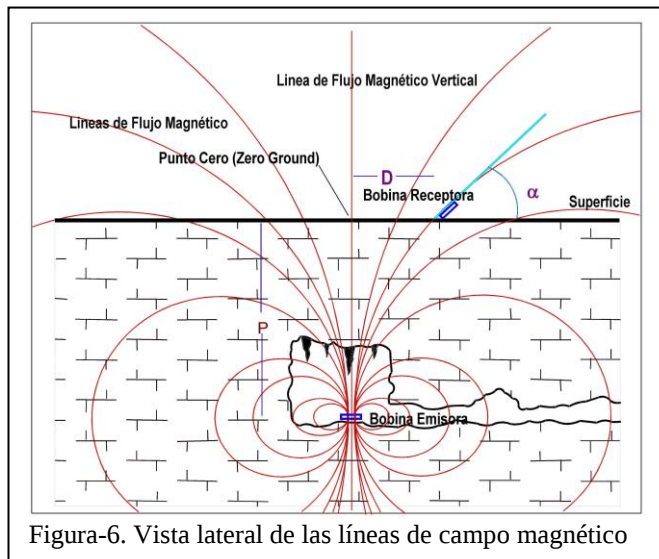
El segundo de los equipos trabaja en superficie. El equipo de superficie tiene dos misiones fundamentales: determinar el punto cero (ground zero) en superficie, punto situado justo en la vertical del emisor y determinar la profundidad del emisor. Debe estar constituido idealmente por tres personas. Una 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 (Foto-11).

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.



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-6 y Figura-7) 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 (ver Figura-7). 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 que 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 (ver Figura-

6). Se coloca la bobina vertical en cualquier punto del triangulo 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-12). 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 esta 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-12. 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 meticulosos 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 diferentes métodos entre los que destacan: Intensidad absoluta del campo magnético, Radiométrico, por Angulo de campo magnético y por búsqueda del nulo horizontal. 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. Dcal y Vcal 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. Es por tanto muy rápido. Los inconvenientes son que se necesita un emisor y un receptor muy estables 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. Los errores pueden ser considerables. Solo da una medida muy aproximada de la profundidad.

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-13). 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 con grandes profundidades (superiores a 20 metros) mostraron bastante error y se descartó este método en posteriores medidas. Sin embargo en profundidades pequeñas (alrededor de 5 metros) y con el uso de la bobina miniatura los resultados son muy buenos y con errores de unos cuantos centímetros.

3.2.3- Angulo de campo magnético

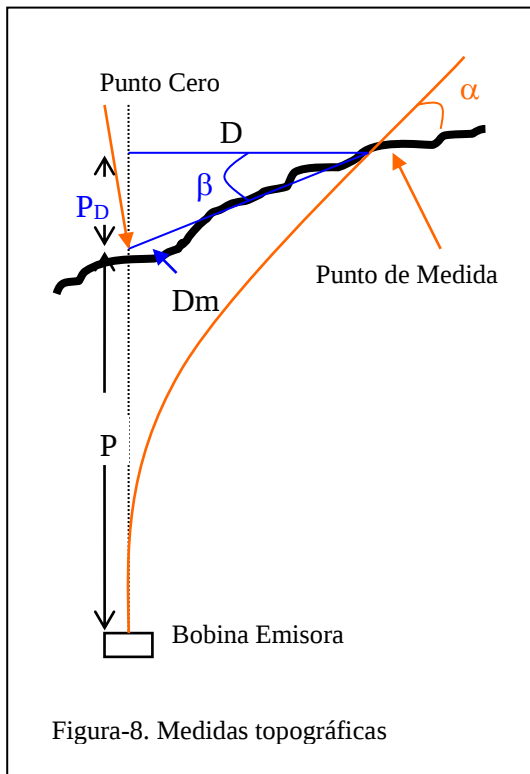
$P = D \cdot \sqrt[3]{V_{cal}/V}$	Fórmula-1
$P = \frac{H}{\left(\sqrt[3]{V_1/V_2}\right) - 1}$	Fórmula-2
$P = \frac{2D}{\sqrt{(8+9\tan^2\alpha)} - 3\tan\alpha}$	Fórmula-3
$\alpha = \arctan(V_H/V_V)$	Fórmula-4
$P = \frac{2D}{\sqrt{(8+9[V_H/V_V]^2)} - 3(V_H/V_V)}$	Fórmula-5
$D = D_m \cdot \cos \beta, P_d = D_m \cdot \seno \beta$	Fórmulas-6

Es el método más empleado por nosotros. Se basa en la medida del ángulo de salida α de las líneas del campo magnético a una determinada distancia D del punto cero (Figura-6). 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°, 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 α 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 α 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 α . Esto exige que la bobina lleve acoplado un transportador de ángulos adecuado.



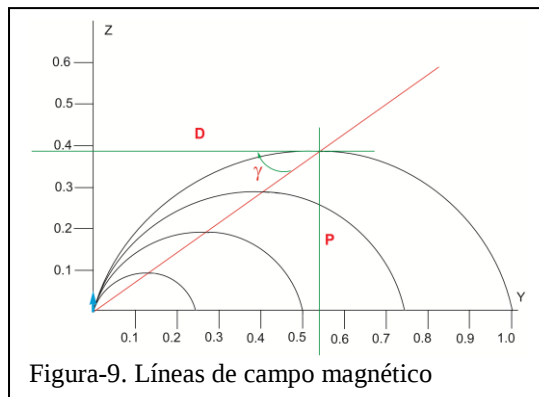
Se puede evitar este inconveniente, tal como hacemos nosotros, midiendo la señal con la bobina en posición vertical y apuntando lateralmente al punto cero (V_V de Fórmula-4) y también con la bobina perfectamente horizontal (V_H de Fórmula-4). Con la fórmula-4 se calcula el ángulo de salida α . Una combinación 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 β entre ambos puntos y mediante las fórmulas-6 determinar la distancia proyectada D y la 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-8).

En pequeñas profundidades no es adecuado, mejor utilizar el siguiente método.

3.2.4- Búsqueda del nulo horizontal

Se basa en el hecho de que las líneas del campo magnético procedentes del emisor se curvan de tal manera (Figura-9) que a un ángulo γ de 35.26° la componente vertical de las líneas magnéticas siempre es cero. La forma práctica de proceder es colocar la bobina receptora perfectamente horizontal en el punto cero y poner la amplificación del receptor a un valor razonable. Nos vamos alejando del punto cero manteniendo la bobina horizontal hasta llegar a un punto en donde la lectura de la señal sea mínima (idealmente cero). Estamos en el punto en que la componente vertical es mínima. Medimos la distancia en horizontal hasta el punto cero y la profundidad de la



señal estará $P=0.707 \times D$. Por supuesto al igual que en el caso de profundidad mediante **Angulo de campo magnético**, se deben realizar las correcciones topográficas adecuadas. Lo ideal es realizar varias medidas en diferentes direcciones y realizar un promedio.

No es un método muy práctico, por la distancia a desplazarse unido a las irregularidades del terreno, para grandes profundidades. Funciona muy bien a pequeñas profundidades.

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° 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° y por tanto despreciable. En el caso de la bobina miniatura la nivelación es casi perfecta.

4.1.2- Errores de recepción

Si la electrónica esta 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° , 90° , 180° y 270° , 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° oscila entre 2 a 4% con ángulos de salida de 20° a 65° 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 con la bobina emisora inicial, y despreciable con la bobina miniatura.

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 o ferromagnéticos, 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.

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.

La localización del punto cero (punto situado justo en la vertical del emisor) pudo ser realizada con mucha precisión (de unos centímetros) ya que no se ve afectada los errores debidos a la geología del terreno, salvo la presencia de rocas magnéticas o ferromagnéticas.

La precisión en la profundidad sí que es afectada por la geología del terreno. Normalmente el error cometido hasta profundidades de unos 60 metros es muy bajo, del orden de 1 a 2 metros. Pero conforme aumentamos la profundidad el error aumenta considerablemente. 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.

Conociendo la conductividad del terreno se puede corregir parcialmente algunos de los errores y mejorar la precisión en la medida de la profundidad, pero se requieren cálculos más complejos.

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.