

7. CONCLUSIONES

Llega el esperado y temido momento de escribir las conclusiones. Esperado porque significa que los interrogantes y dudas existentes al iniciar este trabajo se han resuelto, al menos parcialmente. Temido porque uno tiene la sensación de que se le han quedado cosas por decir o por estudiar.

El objetivo planteado al comenzar este trabajo era: *¿es posible detectar la presencia de estructuras inmersas en el subsuelo a partir de la medida de impedancia eléctrica desde la superficie?*. Evidentemente la respuesta era simple: *sí*. Y es así de simple porque el tema no es nuevo y ha sido objeto de investigación durante todo este siglo. ¿Dónde está pues la supuesta originalidad del trabajo? Una investigación sobre un tema siempre parte de unos estudios y unas ideas anteriores, y en este momento ya pierde parte de su originalidad. Este trabajo más que totalmente original en todos sus múltiples aspectos ha pretendido ser un trabajo riguroso con pequeñas aportaciones originales en cada uno de los temas tratados. El tema no es nuevo pero sí que lo era en el Departament d'Enginyeria Electrònica, donde se ha realizado el trabajo. El tema no es nuevo pero sí que es poco usual plantearse la detección de objetos de tamaño pequeño (decenas de centímetro) a una profundidad de pocos metros. La profundidad a la que un determinado objeto se puede detectar con la medida de la impedancia eléctrica no es un tema totalmente resuelto, como tampoco lo es el uso de algoritmos para obtener imágenes de la distribución de conductividad del subsuelo. Al iniciar este trabajo hace unos cinco años, nos sorprendieron los métodos “primitivos” que se usaban para realizar medidas, en contraste a los “sofisticados” equipos que se utilizan para la medida de la impedancia eléctrica en la tomografía médica. Esto alentaba a la implementación de sistemas de medida automáticos y configuraciones multielectrónicas nuevas para acelerar y mejorar los procesos de medida. No íbamos desencaminados ya que en los últimos años se han empezado a comercializar sistemas automáticos de medida para aplicaciones geoeléctricas.

Las conclusiones de este trabajo se han ido apuntando ya en forma de resúmenes al finalizar cada capítulo. En lo que sigue se intenta sintetizar estas ideas dándoles una visión más global.

Sobre la medida de la resistividad eléctrica del subsuelo

Las medidas de impedancia eléctrica realizadas desde la superficie tratan de localizar objetos y estructuras inmersas en el subsuelo. Para que dichos objetos sean detectables han de tener una resistividad diferente de la del medio donde están inmersos. La localización de estructuras a pocos metros de profundidad tiene aplicación en la Ingeniería Civil, en excavaciones arqueológicas o en la detección de contaminantes. Un problema en la interpretación de las medidas es que un mismo valor de resistividad puede corresponder a diferentes materiales. Incluso un mismo material, dependiendo de su grado de humedad y otros factores externos, puede tener un margen de variación grande de su resistividad. El objetivo del trabajo es realizar las medidas y presentar una imagen de la resistividad (o conductividad) del subsuelo. La interpretación corresponde a los expertos en el tema (geólogos, geofísicos) y puede requerir la utilización de otros métodos geofísicos. De hecho

cada método geofísico aporta información complementaria y lo óptimo (y no siempre posible) es utilizar varios de ellos.

Sobre el problema directo

Antes de realizar las medidas conviene saber qué es lo que mediremos. Es decir, cómo variará la diferencia de potencial en la superficie si el cuerpo enterrado es esférico o cilíndrico. O, por ejemplo, a qué profundidad se podrá detectar los objetos o qué tamaño mínimo han de tener. También es conveniente conocer qué instrumentación se necesitará, qué exactitud ha de tener o qué potencia requerirá.

El problema directo trata de resolver algunas de estas cuestiones. Se dan soluciones analíticas exactas y aproximadas para el caso de la esfera y el cilindro. Con ellas se busca qué configuraciones electródicas son más sensibles a la detección de una esfera. Dado que se utilizan sistemas de medida automáticos, se proponen configuraciones multielectródicas nuevas basadas en configuraciones clásicas. La configuración doble dipolo presenta la mejor visibilidad pero requiere un detector con gran margen dinámico. La configuración Schlumberger presenta un buen compromiso entre visibilidad y margen dinámico. La visibilidad de una esfera conductora es el doble que la de una esfera aislante. Además depende cúbicamente de la relación radio-profundidad. En el caso del cilindro esta dependencia es cuadrática. La visibilidad, tanto de objetos esféricos como cilíndricos, se satura rápidamente con el contraste resistivo entre el objeto y el medio. Así para relaciones mayores a 100 o menores a 0,01 el objeto se comporta como totalmente aislante o conductor respectivamente. A partir de la curva de resistividad aparente normalizada se determina la profundidad y el radio de los objetos, lo que constituye una primera aproximación al problema inverso.

Sobre la instrumentación

Aplicaciones como la prospección arqueológica y estudios medioambientales o de Ingeniería Civil requieren un gran número de medidas. Esto supone un gran trabajo manual al tener que cambiar en cada nueva medida la posición de los electrodos inyectores y/o detectores. Para reducir este trabajo manual y acelerar el proceso de medida y de interpretación de la resistividad del subsuelo, se han implementado tres sistemas de medida automáticos, dos para el laboratorio y otro para medidas de campo. Estos sistemas permiten cualquier combinación de electrodos inyectores y detectores sobre una agrupación de 16 electrodos (laboratorio) y 8 electrodos (campo). La señal inyectada es alterna y la detección es síncrona para evitar los errores provocados por el potencial de electrodo y las corrientes telúricas. A frecuencias cercanas a 1 kHz el campo eléctrico interferente presente en el subsuelo es mínimo (Sumner, 1985). Además, la impedancia de electrodo disminuye con la frecuencia, por lo que con la misma tensión entre los electrodos inyectores la corriente introducida en el terreno aumenta y por tanto la tensión detectada. La frecuencia máxima utilizable viene limitada por la *profundidad de penetración* y por el acoplamiento electromagnético entre el inyector y el detector. El sistema PROGEO permite obtener de la parte real e imaginaria de la impedancia medida, lo que lo diferencia del método resistivo clásico que detecta solamente la parte real. Sin embargo, las señales detectadas están contaminadas por la tensión en modo común, por la

interferencia electromagnética entre el inyector y el detector, y por la interferencia a 50 Hz. El acoplamiento capacitivo e inductivo provoca errores mucho mayores en la parte imaginaria de la impedancia. La configuración doble dipolo es mucho más sensible a estos errores que la configuración Schlumberger.

Si el medio tiene un comportamiento resistivo a la frecuencia de trabajo, como ocurre en las medidas de laboratorio y en las medidas de campo realizadas, sólo interesará detectar la componente en fase de la señal (parte real de la impedancia). En este caso el error en las medidas se puede reducir inyectando señales cuadradas y muestreando en la zona plana de la señal detectada (Gasulla et al., 1998a), una vez el efecto de la interferencia haya desaparecido. Este hecho es independiente de la disposición de los cables y la configuración eléctrica utilizada. El sistema de laboratorio basado en el detector DIES utiliza este método. Además, para reducir la tensión en modo común, se utiliza un electrodo adicional que conecta la referencia del detector con el suelo. El sistema de campo utiliza un amplificador para aumentar la corriente inyectada en el terreno. La adquisición se realiza también con el detector DIES. Para alimentar el sistema se utiliza un grupo electrógeno.

Sobre el problema inverso

A partir de las medidas realizadas se ha de dar una respuesta sobre la distribución de conductividad del subsuelo. El problema inverso trata este tema. Antes de que se dispusiera de ordenadores, el intérprete se basaba en los procedimientos de ajuste de curvas para interpretar un medio supuestamente estratificado. Con la generalización del uso de ordenadores han aparecido muchos trabajos que tratan sobre la interpretación automática y numérica. La aparición de sistemas de medida automáticos, al permitir la adquisición de los datos más rápidamente, ha fomentado la utilización cada vez mayor de algoritmos para obtener imágenes de conductividad en dos y tres dimensiones. A pesar del incremento de la automatización tanto en la adquisición como en la interpretación, conviene seguir aplicando el raciocinio en este proceso. Ello es así porque los algoritmos pueden dar en ocasiones resultados aberrantes. Además algunas medidas pueden ser erróneas y conviene inspeccionarlas.

Existen numerosos algoritmos de reconstrucción propuestos. Los métodos de retroproyección provienen en su mayoría de la tomografía médica y suelen ser de un solo paso (iteración). Sin embargo, la mayoría de técnicas utilizadas en la prospección geofísica utilizan métodos iterativos basados en el criterio de mínimos cuadrados. Los métodos iterativos son lentos ya que a cada iteración han de calcular el problema directo y la matriz de sensibilidad mediante métodos numéricos. En los métodos de un solo paso, donde únicamente se implementa la primera iteración, el tiempo de cálculo se reduce notablemente, sobre todo si se escoge un medio homogéneo como modelo de partida. Gasulla, Jordana y Pallás (1999) muestran que las imágenes obtenidas son suficientemente buenas para detectar objetos locales, por lo que en este trabajo sólo se han utilizado estos métodos.

Un problema está mal definido si pequeños errores en los datos provocan grandes variaciones en la solución. El método resistivo pertenece a esta clase de problemas (LaBrecque et al., 1996). Los métodos de mínimos cuadrados tratan de resolver esta dificultad regularizando el problema, que consiste en añadir información a priori. Los métodos de retroproyección regularizan el problema utilizando la traspuesta de una matriz de sensibilidad ponderada. Aquí se han comparado diferentes algoritmos utilizando datos sintéticos (obtenidos resolviendo el problema directo para una esfera) para las configuraciones electródicas Schlumberger y doble dipolo. Los métodos de mínimos cuadrados son claramente superiores a los métodos de retroproyección. Los métodos de Marquardt y *TSVD* obtienen los menores errores y localizan con mayor precisión el objeto. El factor de regularización λ utilizado en el método de Marquardt se determina mediante el método de la curva L (Hansen y O'Leary, 1992, 1993).

Para resolver el problema inverso se ha linealizado el problema por lo que los valores de conductividad estimados no son los reales. Esto se intenta solucionar normalmente mediante el uso de métodos iterativos. En este trabajo se adopta otra estrategia que consiste en aplicar un factor de corrección a las imágenes obtenidas. El modelo escogido para el subsuelo también influye en el valor de la conductividad estimada. Si el número de celdas es muy superior al número de medidas el problema es muy indeterminado. Utilizando los métodos de retroproyección como información a priori se puede encontrar una solución adecuada. A pesar de que las medidas con configuración doble dipolo tienen errores relativos mayores, se obtienen mejores resultados que con la configuración Schlumberger cuando en aquella se eliminan las medidas más erróneas y se utiliza una matriz de sensibilidad relativa. En general, para estimar correctamente la posición de un objeto, se han de utilizar imágenes y medidas 3D. Sin embargo, para objetos cuya resistividad no varía a lo largo de un eje es posible utilizar medidas e imágenes 2D si la agrupación de electrodos se dispone perpendicularmente a dicho eje. En este caso se ha de realizar una integración previa a lo largo de este eje para calcular la sensibilidad de las celdas.

Sobre los resultados experimentales

La detección de objetos locales inmersos en el subsuelo se ha validado experimentalmente con medidas de laboratorio y de campo. La frecuencia de la señal en ambos casos ha sido de 1 kHz. El modelo de laboratorio es una cubeta de plástico (40 cm × 35 cm × 20 cm) llena de agua donde se sumergen diversos objetos esféricos y cilíndricos tanto aislantes como conductores. Para cancelar el efecto de las dimensiones finitas de la cubeta y de la inexactitud en la posición de los electrodos en el modelo de laboratorio, se realiza una medida de referencia con el objeto lejos de la agrupación de electrodos. Los objetos se localizan correctamente hasta una profundidad igual a tres veces su radio con la configuración Schlumberger localiza e igual a cuatro veces su radio con la configuración doble dipolo. La determinación de la profundidad y el radio de los objetos a partir de las primeras 13 medidas de la configuración Schlumberger proporciona una información complementaria a la obtenida con las imágenes. Las medidas de campo realizadas con una agrupación de 8 electrodos en un terreno agrícola situado en Santa Eulalia de Ronçana (Barcelona), han permitido detectar una tubería de plástico de 8 cm de radio, 1,06 m de largo, previamente enterrada a una profundidad de 24 cm. Para eliminar el efecto del sustrato rocoso presente debajo

del objeto se utiliza una medida de referencia. Para simular una fuga se usa un tubo de plástico situado en el lado sur de la tubería. Las medidas se realizan antes y después de verter el agua. Las imágenes obtenidas permiten detectar la fuga en el lado sur de la tubería justo debajo del tubo de plástico.

Tanto en las medidas de laboratorio como en las medidas de campo se ha de utilizar una medida de referencia para eliminar los efectos no debidos al objeto que se quiere detectar. Estos efectos se deben a la presencia de capas, paredes laterales y a la inexactitud en la posición de electrodos entre otros. Así pues, los métodos utilizados en este trabajo para la obtención de imágenes no son absolutos sino más bien diferenciales (Riu, 1991). Para que la detección de los objetos locales tenga éxito las separaciones entre electrodos, aunque no sean exactamente las previstas, han de mantenerse al desplazar la agrupación. Además, la influencia de otras estructuras no ha de cambiar sustancialmente al desplazar la configuración. Por ejemplo, si se conoce la existencia de una capa debajo del objeto con una inclinación en una determinada dirección la configuración electródica se ha de disponer en esa dirección y desplazarse perpendicularmente a ella. Éste es el caso de las medidas de campo presentadas en el capítulo 6, donde el sustrato rocoso presenta una ligera inclinación en la dirección del eje de la tubería. La detección de cambios temporales de la resistividad (por ejemplo una fuga) es más probable que se detecte con éxito, ya que la configuración electródica no se ha de mover y todos los efectos que no sean el propio cambio de la resistividad se cancelarán.

Sobre las perspectivas de futuro

A pesar de las mejoras logradas en los últimos años en cuanto a la instrumentación y los métodos de interpretación el tema aún está totalmente abierto a nuevas aportaciones. Los sistemas de medida automáticos, aunque han constituido un gran avance, aún son lentos, en comparación con los sistemas utilizados en la tomografía médica, donde se obtienen imágenes en tiempo real (Casas, 1998). En las medidas realizadas sobre modelos analógicos, conviene un sistema de adquisición rápido para eliminar los efectos de la variación temporal de la resistividad y para poder realizar un gran número de pruebas. En las medidas de campo se acortarían los tiempos invertidos en la realización de las medidas con el consiguiente beneficio económico. Un sistema de medida rápido también sería interesante en situaciones donde se requiera una monitorización continua y en tiempo real. El diseño de sistemas que permitan medir impedancias complejas a varias frecuencias puede ser útil en la detección de ciertas estructuras. A pesar de la aparición de sistemas de medida automáticos sigue siendo necesario clavar los electrodos. Además, si se quieren obtener imágenes 3D se ha de desplazar la agrupación de electrodos. Panissod et al. (1998) utilizan electrodos móviles para resolver este inconveniente

Los algoritmos de reconstrucción, sobre todo los iterativos, aún han de mejorar aspectos como el tiempo de cálculo. Además conviene seguir investigando nuevas configuraciones multielectródicas. El procesado de las imágenes obtenidas puede ayudar en la localización de los objetos buscados. Incluso una visualización adecuada, escogiendo los colores más apropiados para resaltar la presencia de los objetos, puede ser de gran utilidad (Rogowitz y Treinish, 1998).