

## Apéndice D. Estimación de los efectos capacitivos e inductivos entre el inyector y el detector

El acoplamiento capacitivo e inductivo entre el sistema inyector y el detector puede provocar errores en la tensión detectada. Con el fin de cuantificar la interferencia en una prospección geoelectrica, realizamos algunas medidas en una zona típica del Campus Nord de la UPC (Gasulla et al., 1998a). La Figura D.1 muestra la disposición de los electrodos, los cables y los instrumentos de generación y medida. Los cables de inyección y detección se disponen en forma triangular paralelos a la superficie. El inyector y el detector están situados en un vértice (TD) de este triángulo, enfrente del dispositivo electrónico Schlumberger. El generador es un HP3245A y el detector es un demodulador síncrono totalmente diferencial (Gasulla et al., 1996). Los cuatro electrodos son de acero inoxidable, de 20 cm de longitud y 1 cm de diámetro. La separación entre los electrodos inyectores A, B es de 13,3 m, y la de los detectores M, N es de 1 m. Los cables son flexibles de radio interior (correspondiente al conductor) 0,5 mm y diámetro exterior (correspondiente a la envoltura de plástico) de 3 mm.

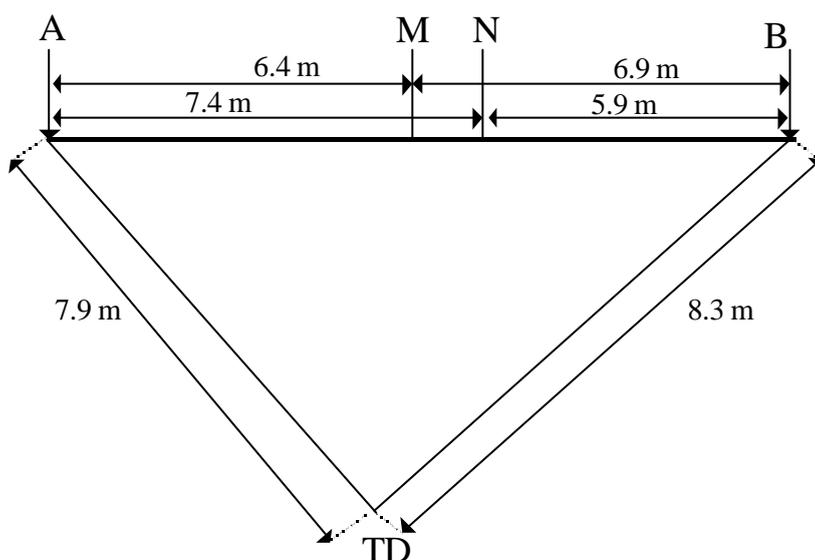


Figura D.1. Prospección geoelectrica: Configuración eléctrica y disposición de los cables

Para medir el acoplamiento inductivo  $M$  cortocircuitamos los cables detectores para que no haya interferencia capacitiva y los disponemos según la figura anterior. La Figura D.2 muestra el circuito equivalente, donde  $I$  es la corriente inyectada,  $L$  es la inductancia de los cables,  $M$  es el acoplamiento inductivo y  $Z_e$  es la impedancia de electrodo. La impedancia de entrada del detector se ha considerado infinita.

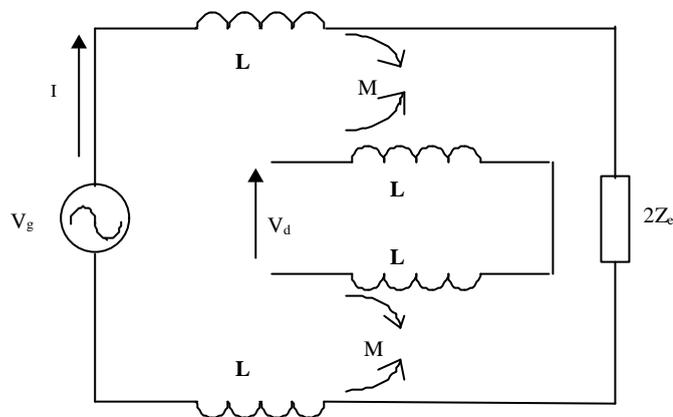
La tensión detectada en el dominio de Laplace es

$$V_d(s) = 2sMI(s) \quad (D.1)$$

Si definimos  $V_{dp}$  como la tensión detectada de pico y  $I_p$  como la corriente de pico inyectada el acoplamiento magnético  $M$  se puede expresar como

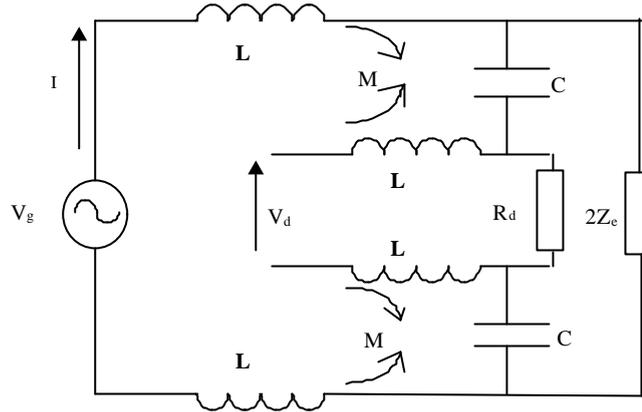
$$M = \frac{V_{dp}}{4\pi f I_p} \quad (\text{D.2})$$

donde  $f$  es la frecuencia de la señal. En las medidas realizadas, se ha generado entre los electrodos A y B una tensión de pico 10 V y frecuencia 10 kHz. La corriente de pico medida  $I_p$  ha sido de 7,1 mA. Por lo tanto, la impedancia de electrodo  $Z_e$  es de unos 700  $\Omega$ . La tensión de pico detectada ha sido  $V_{dp} = 7,2$  mV. Utilizando la expresión anterior se deduce  $M = 8,13$   $\mu\text{H}$ .



**Figura D.2. Circuito equivalente cuando cortocircuitamos los cables detectores para medir el acoplamiento inductivo**

Para estimar la capacidad entre el inyector y el detector conectamos una resistencia  $R_d = 2,7$   $\text{k}\Omega$  entre los extremos de los cables detectores. La Figura D.3 muestra el circuito equivalente en este caso.



**Figura D.3. Circuito equivalente para la medida del acoplamiento capacitivo entre el inyector y el detector**

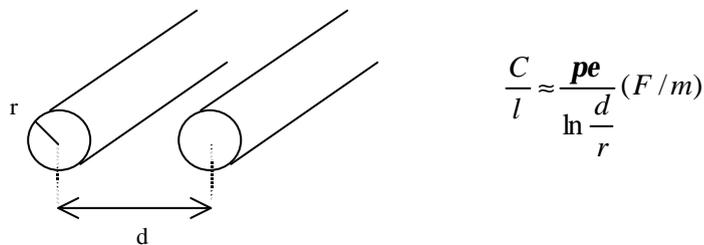
La tensión detectada será debida ahora al acoplamiento inductivo y capacitivo según la expresión

$$V_d(s) \approx 2MsI(s) + s \frac{C}{2} R_d V_g(s) \tag{D.3}$$

donde se ha considerado que la impedancia debida a la capacidad  $C$  es mucho mayor que la  $R_d$ , y que la impedancia de la inductancia  $L$  es mucho menor que la impedancia de los electrodos.

En este caso la tensión generada entre los electrodos A y B es de 2,5 V de pico, con lo que la corriente será ahora cuatro veces menor. La tensión de pico detectada es de 21,6 mV, con lo que, considerando el valor de  $M$  calculado anteriormente, el valor de  $C$  será de 94 pF.

Walker (1990) da valores teóricos de la capacidad y la inductancia mutua entre cables. La Figura D.4 muestra la expresión de la capacidad por unidad de longitud entre dos cables infinitos de radio  $r$  y separados una distancia  $d$ . La capacidad será mayor cuanto menor sea el factor  $d/r$ .

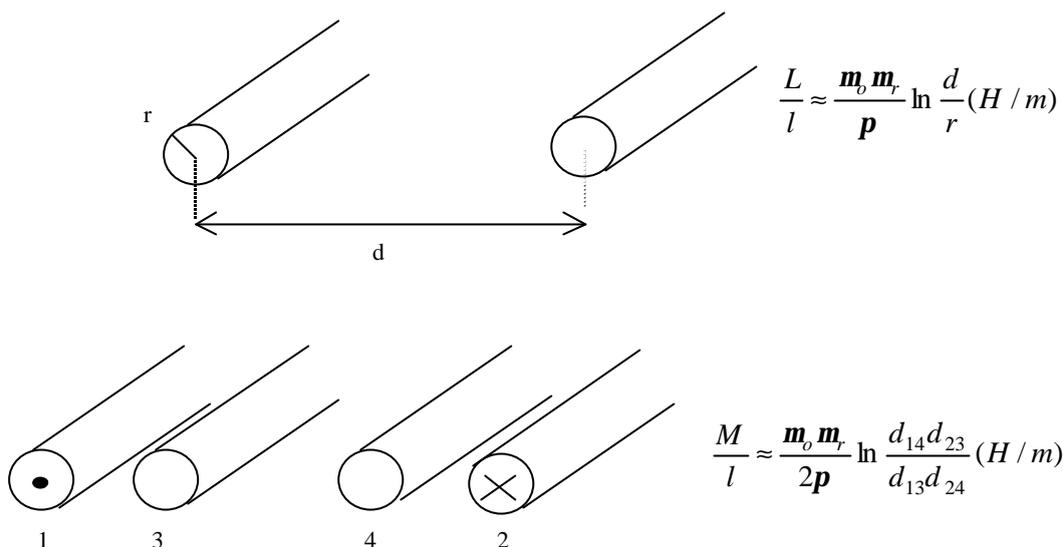


**Figura D.4. Capacidad entre dos cables conductores infinitos**

En los cables utilizados en la medidas  $r = 0,5$  mm y la distancia mínima entre los cables, que viene fijada por su diámetro exterior, es de 3 mm. Con una longitud del cable de 8 m (Figura D.1) la capacidad es de 124 pF, que se aproxima bastante al valor experimental. De hecho el valor teórico es una cota máxima. Si la distancia  $d$  se incrementa a 10 cm y a 1 m, la capacidad disminuye a 42 pF y 29 pF respectivamente. La capacidad entre un cable y el suelo queda en paralelo con la impedancia de electrodo (Apéndice C), y a frecuencias menores a 10 kHz su efecto será despreciable.

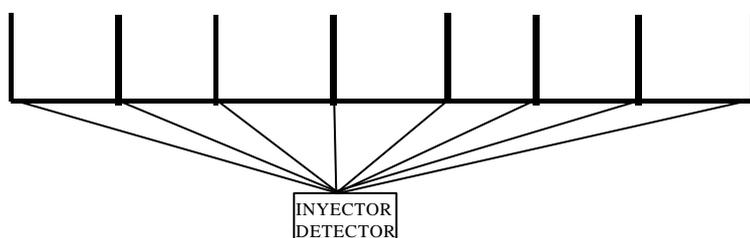
Para calcular la inductancia de los cables detectores  $L_d$  podemos utilizar la expresión de la inductancia de una espira circular o cuadrada con la misma área. El área delimitada por los cables detectores (de radio 0,5 mm) en la Figura D.1 es de unos 30 m<sup>2</sup>, lo que corresponde a una espira circular de radio 3 m y a una espira cuadrada de lado 5,47 m. La inductancia es de 33 μH para la circular y de 39 μH para la cuadrada. La inductancia de los cables inyectores  $L_i$  sería algo menor, ya que finalizan en los electrodos A y B. Una aproximación burda sería multiplicar el resultado anterior por un factor de relación entre la longitud de los cables inyectores (16 m) y la longitud de los cables detectores (29 m). El resultado será de 18,2 μH o de 21,5 μH si consideramos la espira circular o la cuadrada respectivamente.

Una manera de calcular la inductancia mutua  $M$  sería multiplicar la inductancia de los cables inyectores  $L_i$  por la relación obtenida al dividir la inductancia de un par de cables paralelos por la inductancia mutua entre dos pares de cables paralelos (Figura D.5). Si consideramos el caso anterior de una espira cuadrada  $d = 5,47$  m y  $r = 0,5$  mm,  $L/l$  será igual a 3,7 μH/m. Para la inductancia mutua tendríamos que  $d_{14} \cong d_{23} \cong 5,47$  m y  $d_{13} \cong d_{24} \cong 3$  mm. Por tanto,  $M/l$  será 3,0 μH/m. El cociente  $M/L$  será 0,81. Si multiplicamos este cociente por la inductancia de los cables inyectores  $L_i$  tendremos la inductancia mutua entre los cables inyectores y los detectores. El resultado es de 14,8 μH o de 17,6 μH dependiendo si partimos de la espira circular o cuadrada. Estos resultados son una cota máxima y se acercan bastante al calculado experimentalmente ( $M = 8,1$  μH). Si las distancias  $d_{13}$  y  $d_{24}$  fueran de 10 cm o 1m el cociente  $M/L$  sería 0,43 o 0,18 respectivamente.



**Figura D.5. Inductancia entre dos cables paralelos e inductancia mutua entre dos pares de cables paralelos.**

A modo de receta, la capacidad  $C$  y la inductancia mutua  $M$  entre dos cables disminuye separando la distancia entre ellos. Por el contrario la autoinductancia  $L$  disminuye reduciendo el área, lo que implica acercar los cables. Esto se complica por el hecho de utilizar un sistema automático de medida en el que cualquier electrodo puede ser inyector o detector. Por lo tanto, trenzar los cables detectores para reducir el acoplamiento inductivo es una mala estrategia, ya que aumenta la capacidad de entrada del detector (reduce su impedancia), y en otra medida uno de los cables detectores puede ser un inyector con lo que en ese caso aumentaríamos la inductancia mutua entre el inyector y el detector. Un compromiso podría ser mantener todos los cables separados entre sí de 10 cm a 1 m con lo que en cualquier combinación inyección-detección tendríamos acoplamientos capacitivos e inductivos relativamente reducidos. Si acercamos el inyector y el detector a la configuración electródica reduciríamos el área que delimitan los cables y, por tanto, su inductancia (Figura D.6). Además conviene tener los cables totalmente extendidos para evitar aumentar la inductancia de los cables (por ejemplo si parte del cable está enrollado en un carrete)



**Figura D.6. Disposición de los cables y de los instrumentos para reducir el acoplamiento inductivo y capacitivo.**

Para el sistema de laboratorio los valores máximos estimados para  $C$  y  $M$  han sido de 11,6 pF y de 0,61  $\mu$ H respectivamente.