

Apéndice C. Impedancia de electrodo

La impedancia de electrodo puede ser modelada como la suma de una resistencia de contacto y una impedancia electroquímica. La resistencia de contacto viene dada por la dificultad que opone el terreno al paso de corriente en las proximidades del electrodo. Consideremos un electrodo puntual en la superficie de un terreno homogéneo de resistividad \mathbf{r} (Figura C.1).

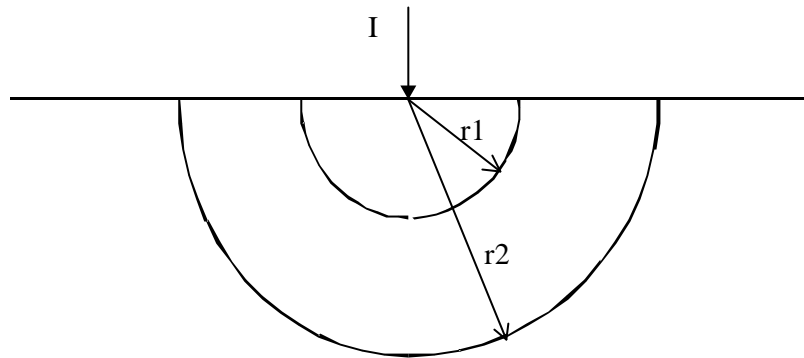


Figura C.1. Electrodo puntual de corriente en la superficie de un terreno

El potencial V_1 a la distancia r_1 del electrodo será

$$V_1 = \frac{rI}{2pr_1} \quad (\text{C.1})$$

A la distancia r_2 el potencial valdrá

$$V_2 = \frac{rI}{2pr_2} \quad (\text{C.2})$$

La resistencia de la capa semiesférica comprendida entre r_1 y r_2 será

$$R = \frac{V_1 - V_2}{I} = \frac{\mathbf{r}}{2\mathbf{p}} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{C.3})$$

Si r_1 y r_2 difieren entre sí una cantidad pequeña dr

$$R \cong \frac{\mathbf{r}}{2\mathbf{p}r^2} dr \quad (\text{C.4})$$

La corriente I va atravesando sucesivamente capas semiesféricas cuyas resistencias respectivas decrecen con el cuadrado de la distancia. Por lo tanto, las capas de mayor radio influyen poco en la

resistencia de contacto, concentrándose ésta en la inmediata proximidad del electrodo. Si suponemos que éste tiene forma semiesférica de radio r_c , la resistencia de contacto R_c del electrodo, entendida como la comprendida entre el electrodo y el infinito, es

$$R_c = \frac{V_c}{I} = \frac{r}{2pr_c} \quad (\text{C.5})$$

En la practica geoelectrica suelen usarse como electrodos barrenas de acero puntiagudas. La resistencia de contacto de un electrodo cilíndrico de radio r introducido una longitud l en un terreno homogéneo de resistividad r es (Orellana 1982)

$$R_c = \frac{r}{2pl} \cdot \ln \frac{2l}{r} \quad (\text{C.6})$$

Por lo tanto, la resistencia de contacto disminuye al aumentar r y l , es decir, al aumentar la superficie de contacto de la piqueta con el terreno.

La impedancia electroquímica del electrodo mide la oposición al paso de corriente, que presenta la interfaz entre electrodo y electrolito (el terreno). La Figura C.2 es un modelo simplificado que, además, incluye la resistencia de contacto y el potencial E generado en la interfaz electrodo-electrolito. C_s es la capacidad de la superficie del electrodo, R_p es una resistencia. La impedancia equivalente se ha obtenido sin considerar el potencial E . A frecuencias altas el condensador C_s presenta baja impedancia, por lo que la impedancia de electrodo será R_c .

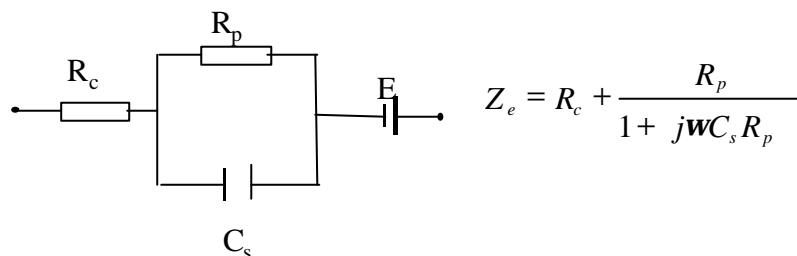


Figura C.2. Modelo simplificado de la impedancia de electrodo

A modo de ejemplo, si introducimos en el terreno piquetas cilíndricas de diámetro 1 cm, a una profundidad de 15 cm, la resistencia de contacto será de $4'35r$. En el prototipo de laboratorio utilizado las piquetas son barritas cilíndricas de 3 mm de diámetro y sumergidas varios milímetros. Si están sumergidas 3 mm su resistencia de contacto es de $75r$. En cambio la impedancia equivalente del terreno entre los electrodos de medida suele ser mucho menor. En una configuración Schlumberger de 16 electrodos equiespaciados la impedancia mínima se produce al inyectar por los electrodos 1-16 y detectar por 8-9. La tensión medida es

$$V_d = \frac{rI}{2pd} 0'0357 \quad (C.7)$$

donde r es la resistividad del terreno, I es la intensidad que se inyecta, y d es la distancia entre electrodos. La impedancia equivalente del terreno es

$$Z_t = \frac{V_d}{I} = \frac{0'0357 r}{2pd} \quad (C.8)$$

Si $d = 1$ m, $Z_t = 5,68 \times 10^{-3} r$. En cambio en el prototipo de laboratorio $d = 2$ cm y $Z_t = 0'28 r$. La relación Z_e/Z_t es en el primer caso de 766, mientras que en el segundo es de 267.

Una forma de calcular los parámetros en el modelo de impedancia de electrodo (Figura C.2) es utilizar señales cuadradas y realizar medidas en el dominio temporal (Cobbold, 1974). La Figura C.3 muestra el circuito equivalente de medida, donde Z_e es la impedancia de electrodo, R_t la resistencia del terreno, R_o una resistencia de referencia de valor conocido y V_g una señal cuadrada de período T y valor de pico V_p .

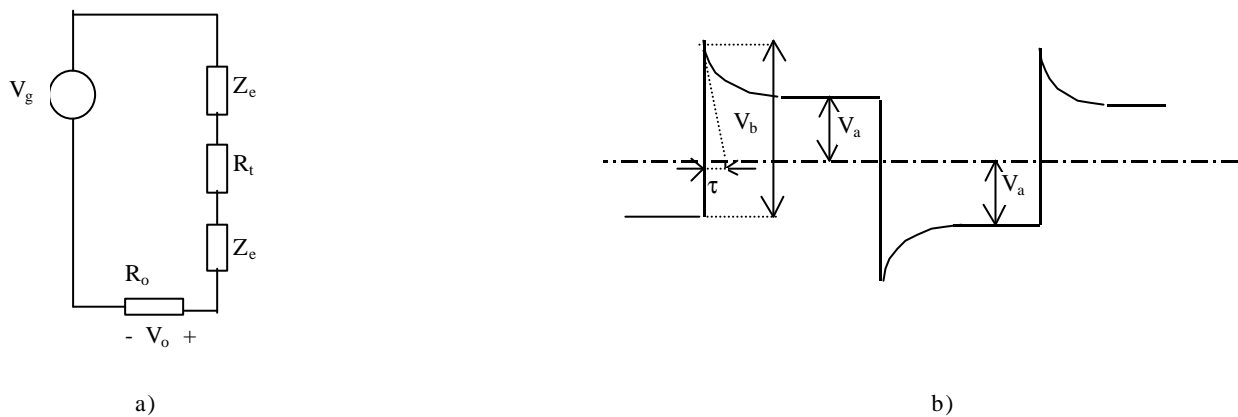


Figura C.3. a) Circuito equivalente de medida de la impedancia de electrodo. b) Tensión medida en R_o .

Si utilizamos el modelo de la Figura C.2 para Z_e y consideramos R_t mucho menor que la resistencia de contacto R_c , la tensión V_o en bornes de R_o , en el dominio de Laplace, es

$$V_o(s) = \frac{R_o}{R_o + 2R_c} \frac{2R_c + R_o}{2(R_c + R_p) + R_o + sR_p(2R_c + R_o)C_1} V_g(s) \quad (C.9)$$

La tensión cuadrada V_g se puede expresar en el dominio temporal como

$$V_g(t) = V_p \left[u(t) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n 2u(t - nT) \right] \quad (\text{C.10})$$

donde $u(t)$ es la función escalón. Si R_o es mucho menor que la resistencia de contacto R_c la respuesta temporal de V_o queda

$$V_o(t) = V_p \left(\frac{R_o}{2(R_c + R_p)} + \frac{R_o R_p}{2R_c(R_c + R_p)} e^{-\frac{t}{(R_c \parallel R_p)C_s}} \right) \left(u(t) + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n 2u(t - nT) \right) \quad (\text{C.11})$$

Si la constante de tiempo $t = (R_c \parallel R_p)C_s$ es bastante menor que el período de la señal, las tensiones V_a y V_b en la Figura C.3 son

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{R_o}{2(R_c + R_p)} V_p \\ V_b &= \frac{R_o}{R_c} V_p \\ t &= (R_c \parallel R_p) \end{aligned} \quad (\text{C.12})$$

Por tanto, conociendo V_p , V_a , V_b , R_o y t , podemos determinar los parámetros de la impedancia de electrodo R_c , R_p y C_s .

Si sumergimos los electrodos unos 7 mm la resistencia de contacto es aproximadamente de $50r$, que con una resistividad del agua de $7 \Omega\text{m}$ corresponde a 350Ω . Con una tensión de pico V_p del generador de 10 V, y $R_o = 10 \Omega$, medimos $V_a = 110 \text{ mV}$, $V_b = 290 \text{ mV}$ y $t = 50 \text{ ms}$. Aplicando las expresiones anteriores obtenemos $R_c = 345 \Omega$, $R_p = 110 \Omega$ y $C_s = 0,71 \text{ mF}$. Con estos valores, a frecuencias superiores a 1 kHz la impedancia de electrodo es prácticamente resistiva de valor R_c .

La forma más usual de caracterizar la impedancia de electrodo es a partir de medidas a varias frecuencias. La muestra el módulo y la fase de la impedancia de un par de electrodos adyacentes, medidos entre 10 Hz y 10 kHz con dos puntos por década. Las medidas se han realizado con el sistema PROGEO inyectando una señal de 2 Vpp.

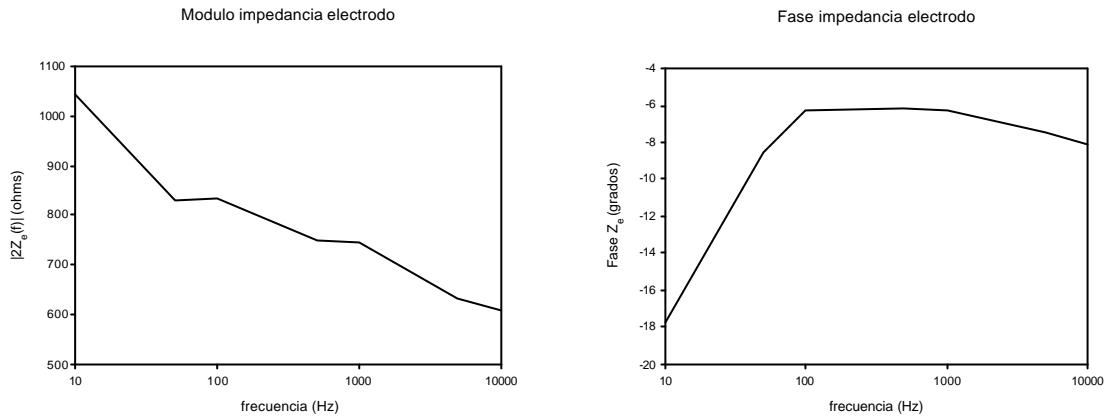


Figura C.4. Impedancia de un par de electrodos adyacentes a diferentes frecuencias.

Estas medidas no se ajustan al modelo encontrado inyectando una señal cuadrada. De hecho, la respuesta temporal a una cuadrada no responde del todo a una forma exponencial. La impedancia de electrodo tiene normalmente un comportamiento complejo y necesita de un modelo circuital más complicado, con componentes que varían con la frecuencia (Cobbold, 1974). Sin embargo, nuestro interés radica más bien en mostrar que la impedancia de electrodo decrece y es más resistiva a medida que la frecuencia aumenta, lo que queda patente a partir de los resultados anteriores (tanto utilizando señales cuadradas como senoidales).

La impedancia de electrodo varía de unos electrodos a otros, lo que puede degradar el CMRR del detector. Además, según (C.6) la impedancia se reduce con la profundidad del electrodo. La muestra la impedancia ($f = 1$ kHz) de los 15 pares de electrodos adyacentes en una agrupación de 16 electrodos sumergidos aproximadamente 7 mm y 2 mm respectivamente.

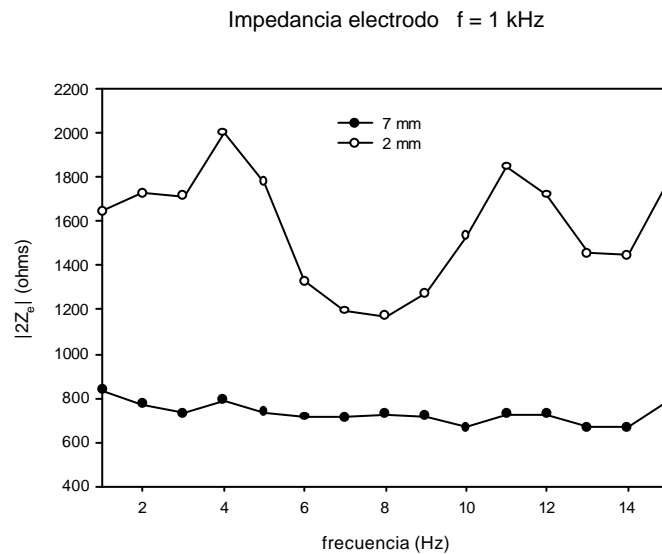


Figura C.5. Impedancia a 1 kHz de pares adyacentes de electrodos en una agrupación de 16 electrodos.

Si entre los electrodos de inyección A y B generamos una tensión de amplitud fija (senoidal o cuadrada) la corriente inyectada aumentará si la impedancia de electrodo disminuye. Un aumento de corriente provoca un aumento en la tensión diferencial medida entre los electrodos M y N, y por tanto una mejora en la relación S/N medida. Por lo tanto, para disminuir la impedancia de electrodo es conveniente clavar (o sumergir) los electrodos suficientemente, y trabajar a una frecuencia elevada (con lo que se reducen también los errores debidos a la interferencia de 50 Hz y a las corrientes telúricas). El límite superior de la frecuencia de trabajo vendrá limitado entre otros factores por la *penetración nominal* (apartado 4.2) y por el acoplamiento electromagnético entre el inyector y el detector (apartado 4.3.3).