

METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

Definición inductancia mutua

Inductancia Mútua

La inductancia mútua M_{12} entre 2 circuitos, 1 y 2, es definido como el flujo total: Φ_{12} , a través del circuito 1 producido por una corriente unitaria en circuito 2:

$$M_{12} = \frac{\Phi_{12}}{i_2} = \frac{\int_{s_1} B_2 \cdot ds_1}{i_2} = \frac{\int_{s_1} \nabla \times A_2 \cdot ds_1}{i_2} = \frac{\oint_{\gamma_1} A_2 \cdot d\ell_1}{i_2}$$

De acuerdo a ecuación (93), el potencial vectorial A_2 puede ser expresado como:

$$A_2 = \frac{\mu i_2}{4\pi} \oint \frac{d\ell_2}{r},$$

y en consecuencia la inductancia mútua M_{12} se define finalmente como:

$$M_{12} = \frac{\mu}{4\pi} \oint \oint \frac{d\ell_1 \cdot d\ell_2}{r} = \frac{\mu}{4\pi} \oint \oint \frac{\cos\theta}{r} d\ell_1 d\ell_2$$

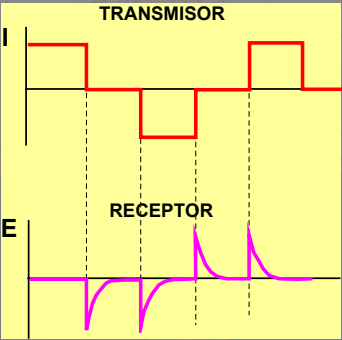
geometría	representación	M_{12}
círculos coaxiales		$\frac{0.2 \pi^2 a^2 b^2}{s^3} \approx \frac{2 a^2 b^2}{s^3}$
círculos coplanarios		$\frac{0.1 \pi^2 a^2 b^2}{s^3} \approx \frac{a^2 b^2}{s^3}$

METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

INTERACCION PRIMARIO-SECUNDARIO

En el método TEM se observa la respuesta del medio en estudio una vez que el campo primario se interrumpe abruptamente.

De tal forma que la señal en el receptor corresponde exclusivamente a la respuesta transiente del medio ante la excitación de una señal electromagnética previa.



METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

INTERACCION PRIMARIO-CONDUCTOR TERRESTRE

La fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida en la bobina conductora en función de la corriente alterna que circula en la bobina primaria es:

$$e_s = -i\omega M_{TC} i_p$$

Esta f.e.m. inducida en la bobina conductora puede expresarse también en términos de la impedancia y la corriente i_s que se induce en el cuerpo

$$e_s = -i\omega M_{TC} i_p = -i_s (r_s + i\omega L_s)$$
$$\Rightarrow i_s(\omega) = \frac{i\omega M_{TC} i_p}{(r_s + i\omega L_s)}$$

METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

INTERACCION CONDUCTOR TERRESTRE-SECUNDARIO

Esta corriente $i_s(s=i\omega)$ puede ser transformada al dominio temporal $i_s(t)$ utilizando la antitransformada de Laplace:

$$i_s(t) = T.LP.^{-1} \left[\frac{i\omega M_{TC} i_P}{(r_s + i\omega L_s)} \right] = \frac{-M_{TC} i_o e^{-t/\tau}}{L_s}$$

con $\tau = L / R \equiv \text{constante de decaimiento}$

En consecuencia, en la bobina receptora (secundario) la f.e.m. inducida es:

$$E^{\text{sec}}(t) = M_{CR} \frac{d i_s}{d t} = I_o R \frac{M_{CR} M_{TC}}{L_s^2} e^{-t/\tau}$$

METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

INTERACCION CONDUCTOR TERRESTRE-SECUNDARIO

Esta corriente $i_s(s=i\omega)$ puede ser transformada al dominio temporal $i_s(t)$ utilizando la antitransformada de Laplace:

$$i_s(t) = T.LP.^{-1} \left[\frac{i\omega M_{TC} i_P}{(r_s + i\omega L_s)} \right] = \frac{-M_{TC} i_o e^{-t/\tau}}{L_s}$$

con $\tau = L / R \equiv \text{constante de decaimiento}$

En consecuencia, en la bobina receptora (secundario) la f.e.m. inducida es:

$$E^{\text{sec}}(t) = M_{CR} \frac{d i_s}{d t} = I_o R \frac{M_{CR} M_{TC}}{L_s^2} e^{-t/\tau}$$

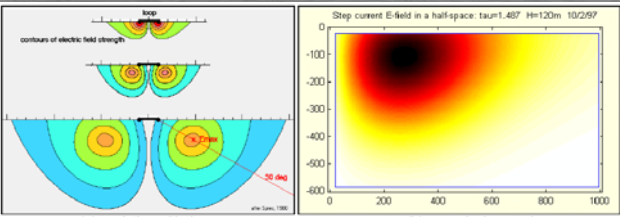
METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

EVOLUCION TEMPORAL DE TRANSIENTE ELECTRICO

A medida que avanza el tiempo el campo electrico se difunde en el medio conductor y decayendo en intensidad

$$E^{\text{sec}}(t) = I_o R \frac{M_{CR} M_{TC}}{L_s^2} e^{-t/\tau}$$

$\tau = L / R$



METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

INTERACCION CONDUCTOR TERRESTRE-SECUNDARIO:
SISTEMA DE CAPAS

La impedancia mutua $Z(t)=V(t)/I$ (voltaje transiente ($V(t)$) dividido por la corriente aplicada (I)) en un sistema de N capas horizontales excitado por una bobina circular de radio a (que a su vez se utiliza de receptor), esta dado por:

$$Z(t) = \pi \mu a \int_0^\infty L^{-1} [A_0(h_i, \rho_i, \lambda)] J_1(\lambda a)^2 d\lambda$$

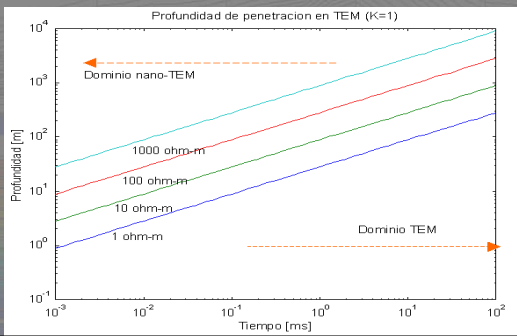
J_1 : Funcion de Bessel orden 1
 L^{-1} : Transformada inversa de Laplace

En este caso la complejidad numérica requiere de algoritmos complejos y gran capacidad computacional para su evaluación.

METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

RESPUESTA TEM GENERAL:

- La profundidad de penetración en el método TEM es: $H_{penetracion} = \sqrt{k \frac{t}{\mu \sigma}}$
k depende de la configuración de la fuente (entre 0.35 y 5)



METODO TEM: SISTEMAS DE MEDICION

El sistema TEM en sus diferentes modalidades utiliza los siguientes tipos de transmisores y receptores:

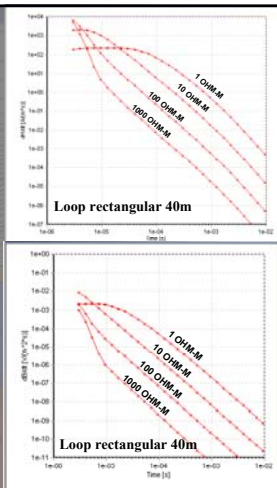
Transmisor:

- loops electricos (circulares o rectangulares)
- campos magnéticos (bobinas)

Receptor:

- bobinas [dH/dt : A/(m·s)]
- campos electrico [dB/dt: V/(m²·s)]

Si bien las unidades cambian el fenómeno fisico de disipación del campo electrico es el mismo.

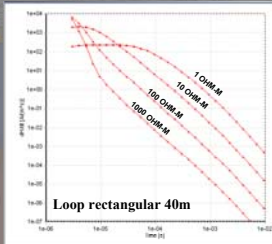


METODO TEM: SISTEMAS DE MEDICION

La amplitud del potencial eléctrico medido es directamente proporcional a la resistividad del conductor, pero la constante de tiempo τ es a su vez inversamente proporcional a la resistencia del conductor.

En consecuencia un cuerpo resistivo presenta una amplitud inicial mayor que un cuerpo conductor, pero el decaimiento temporal de un cuerpo resistivo es mas fuerte que en el caso de un cuerpo conductor

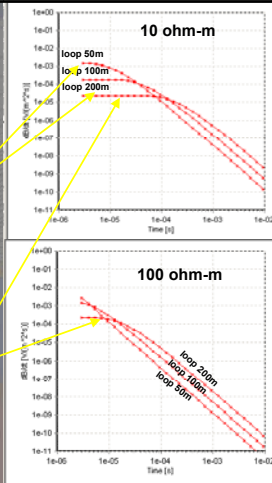
$$E^{sec}(t) = I_o R \frac{M_{CR} M_{TC}}{L_s^2} e^{-t/\tau}$$
$$\tau = L / R$$



METODO TEM: SISTEMAS DE MEDICION


Tamaño del loop condiciona la detección de la señal deseada en función de la resistividad del medio:

- a medida que el tamaño del loop transmisor aumenta se debe medir una mayor ventana de tiempos tardios (para detectar curva de decaimiento característico)
- Si la resistividad del medio es mayor la señal de decaimiento se alcanza en tiempo mas cercanos.

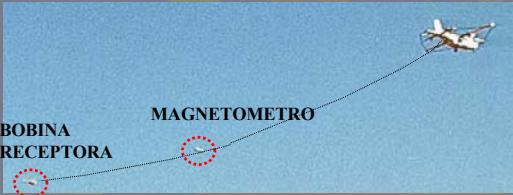


METODO TEM: INSTRUMENTAL

BOBINA TRANSMISORA

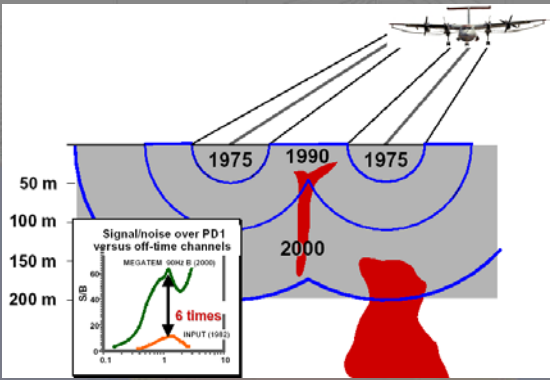


SISTEMA AEREO GEOTEM



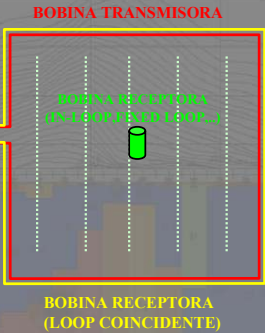
METODO TEM: INSTRUMENTAL

EVOLUCION EN EL TIEMPO DE PENETRACION EN SISTEMAS AEREOS



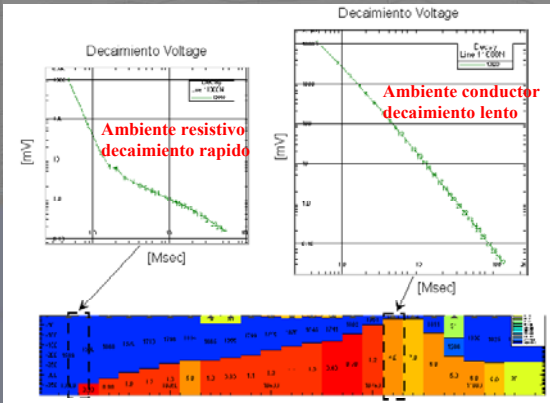
METODO TEM: INSTRUMENTAL

SISTEMA ZONGE (GDP32): TERRESTRE



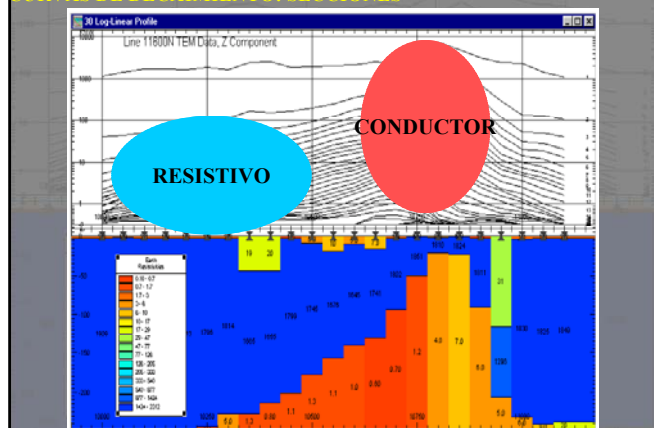
METODO TEM: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

CURVAS DE DECAIMIENTO



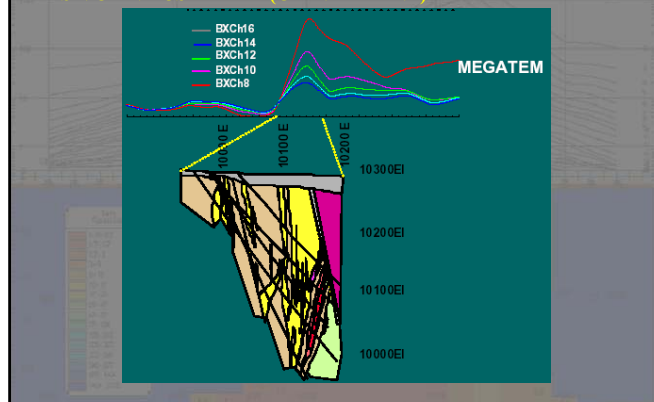
CURVAS DE DECAIMIENTO: SECCIONES

CURVAS DE DECAIMIENTO: SECCIONES

[illegible]

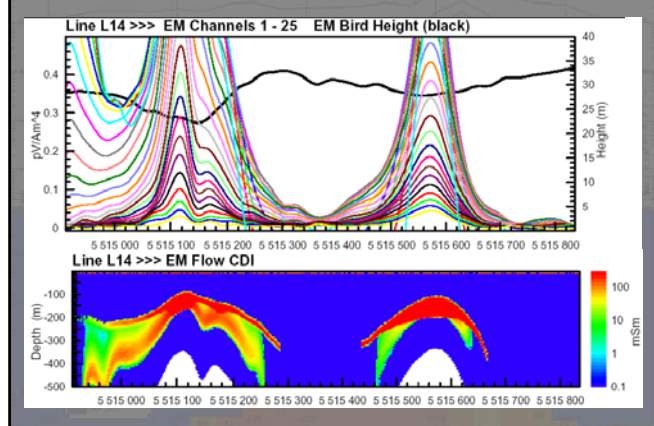
METODO TEM: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

CURVAS DE DECAIMIENTO: SECCIONES SULFURO MASIVO EN AUSTRALIA (CARVER MINE)



METODO TEM: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

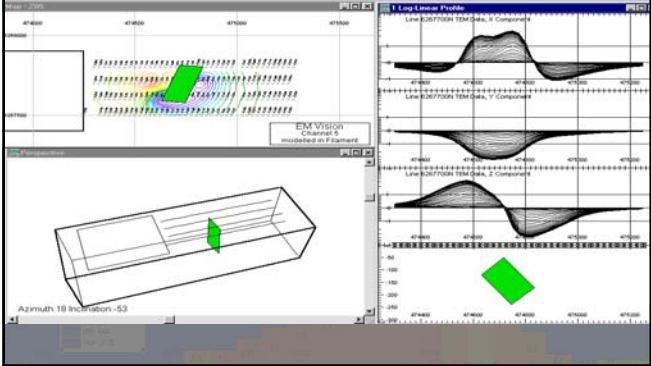
CURVAS DE DECAIMIENTO: SECCION E INVERSION



METODO TEM: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

CUERPOS 3-D
CONTORNOS A DISTINTOS
TIEMPOS (PROFUNDIDAD)

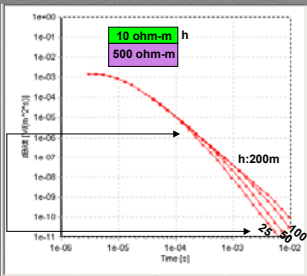
SECCIONES DE DECAIMIENTO
POR PERFIL (MEDICION DE
3 COMPONENTES)



METODO TEM: RESPUESTA DE GEOMETRIAS SIMPLES

Conductor en basamento resistivo (cuenca)

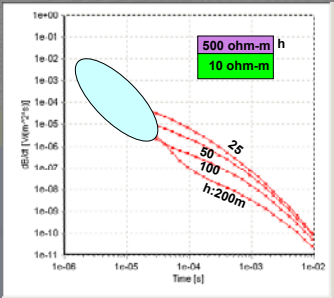
Disminución del decaimiento
a medida que aumenta la
potencia del conductor



METODO TEM: RESPUESTA DE GEOMETRIAS SIMPLES

Resistivo sobre conductor (costra de caliche, sedimentos secos
sobre acuífero, cap silíceo sobre cuerpo mineralizado)

Decaimiento asociado
a resistivo en tiempo
tempranos, para
menores espesores es
necesario muestrear
mas altas frecuencias



METODO TEM: RESPUESTA DE GEOMETRIAS SIMPLES

Conductor entre resistivo somero y basamento resistivo (por ejemplo acuífero o cuerpo mineralizado entre gravas secas y basamento cristalino)

Decaimiento asociado a resistivo somero

Decaimiento asociado a conductor, se extiende a tiempos lejanos para $h \gg$

Decaimiento asociado a basamento, curvas paralelas expuestas en mayores tiempos tardíos para $h \gg$

METODO TEM: RESPUESTA DE GEOMETRIAS SIMPLES

Resistivo entre conductor somero y conductor moderado (por ejemplo secuencia de basaltos entre gravas no compactadas y compactadas)

Difícil discriminación de distintos espesores de cuerpo resistivo dada la rápida disipación de la señal electromagnética

METODO TEM: CONCLUSIONES

- Detección de propiedades eléctricas
- Pérdida de resolución con la profundidad, penetraciones de 200-400m en sistemas tradicionales
- Método inductivo, no hay problemas de inyección de corriente en ambientes muy resistivos
- Modelamiento en imágenes de profundidad con programas de inversión de 1-D (interpretación cualitativa no es confiable)
- Carencia de modelamientos 2-D apropiados para interpretación minera
- Costos de US 300-800/km
