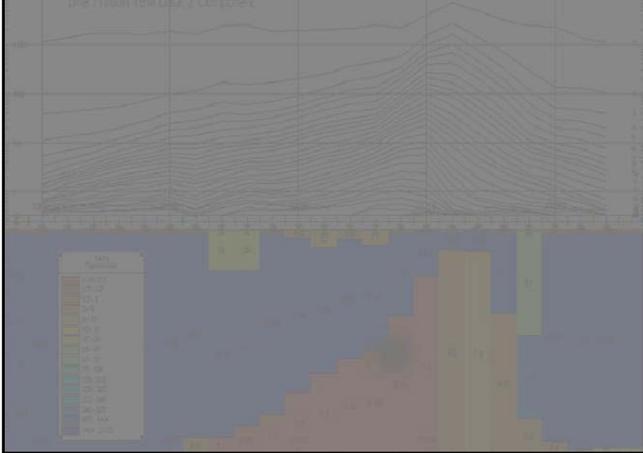
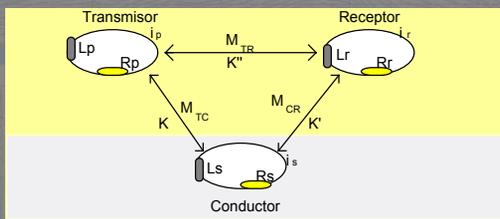


METODO TEM

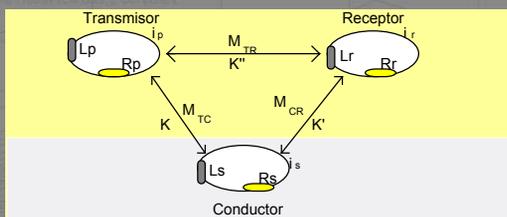


METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

En los métodos electromagnéticos con fuente artificial se produce la interacción entre un campo electromagnético generado en la fuente (campo primario), la inducción electromagnética en un cuerpo conductor de subsuperficie (campo secundario), y la recepción de ambos campos en el receptor. Esta configuración se describe esquemáticamente en términos de un arreglo de bobinas que representan la configuración transmisor-conductor-receptor.



METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS



- R_p , R_r , y R_s son las resistencias del transmisor, receptor, y conductor respectivamente.
- L_p , L_r , y L_s son las respectivas inductancias.
- M_{TR} , M_{CR} , y M_{TC} son las inductancias mutuas entre transmisor-receptor, receptor-conductor, y transmisor-conductor, respectivamente.
- Para cada uno de estas inductancias mutuas se define además un factor geométrico K'' , K' , K , que da cuenta de la geometría relativa entre cada bobina.

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:

$$M_{12} = \frac{\Phi_{12}}{i_2} = \frac{\int_{s_1} \mathbf{B}_2 \cdot d\mathbf{s}_1}{i_2} = \frac{\int_{s_1} \nabla \times \mathbf{A}_2 \cdot d\mathbf{s}_1}{i_2} = \frac{\oint_{l_1} \mathbf{A}_2 \cdot d\mathbf{l}_1}{i_2}$$

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

$$\mathbf{A}_2 = \frac{\mu i_2}{4\pi} \oint \frac{d\mathbf{l}_2}{r}$$

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

$$M_{12} = \frac{\mu}{4\pi} \oint \oint \frac{d\mathbf{l}_1 \cdot d\mathbf{l}_2}{r} = \frac{\mu}{4\pi} \oint \oint \frac{\cos\theta}{r} d\mathbf{l}_1 d\mathbf{l}_2$$

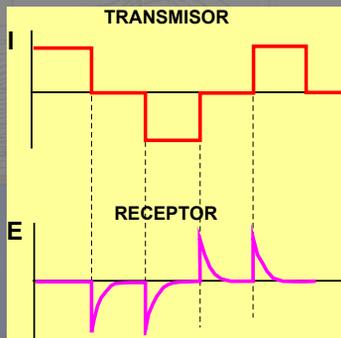
geometría	representación	M_{12}
circuitos coaxiales		$\frac{0.2 \pi^2 a^2 b^2}{s^3} - \frac{2a^2 b^2}{s^3}$
circuitos coplanarios		$\frac{0.1 \pi^2 a^2 b^2}{s^3} - \frac{a^2 b^2}{s^3}$

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 $\tau = L/R \equiv$ constante de decaimiento

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

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

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 $\tau = L/R \equiv$ constante de decaimiento

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

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

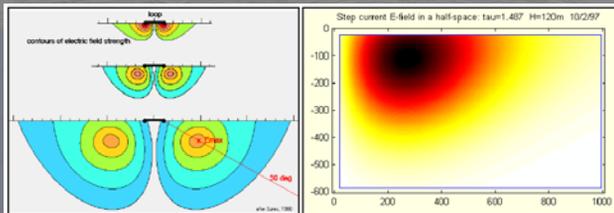
METODO TEM: PRINCIPIOS BASICOS

EVOLUCION TEMPORAL DE TRANSIENTE ELECTRICO

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

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

$\tau = L/R$



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:

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

J_1 : Funcion de Bessel orden 1

L^{-1} : Transformada inversa de Laplace

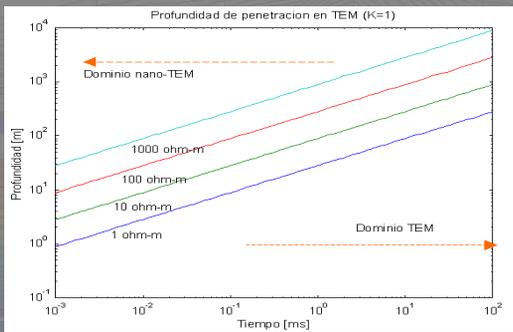
En este caso la complejidad numérica requiere de algoritmos complejos y gran capacidad computacional para su evaluación.

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:

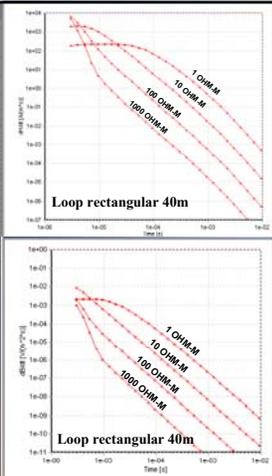
Transmisor:

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

Receptor:

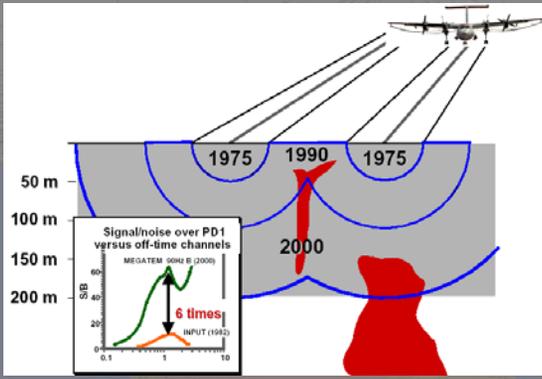
- bobinas [dH/dt : A/(m·s)]
- campos electrico [dB/dt: V/(m·s)]

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



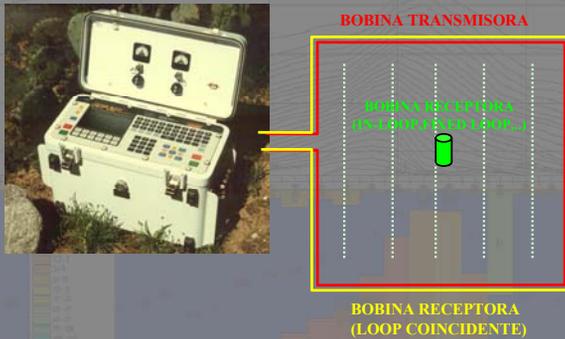
METODO TEM: INSTRUMENTAL

EVOLUCION EN EL TIEMPO DE PENETRACION EN SISTEMAS AEREOS



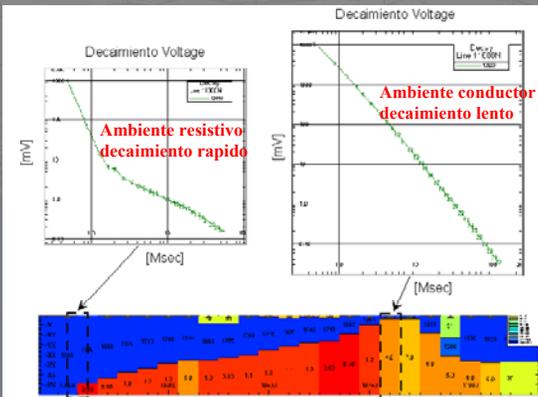
METODO TEM: INSTRUMENTAL

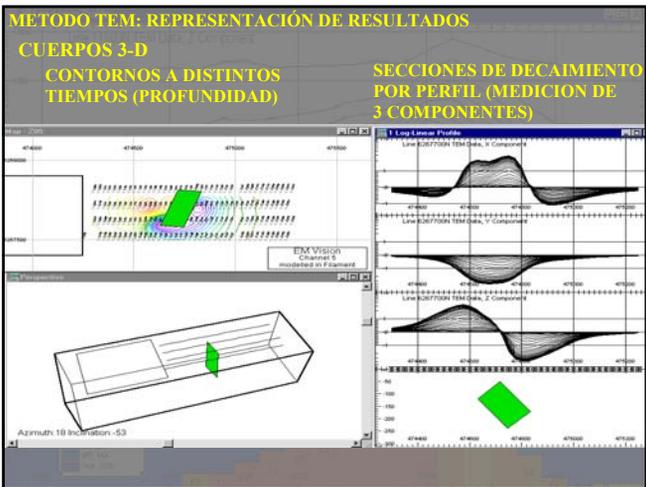
SISTEMA ZONGE (GDP32): TERRESTRE

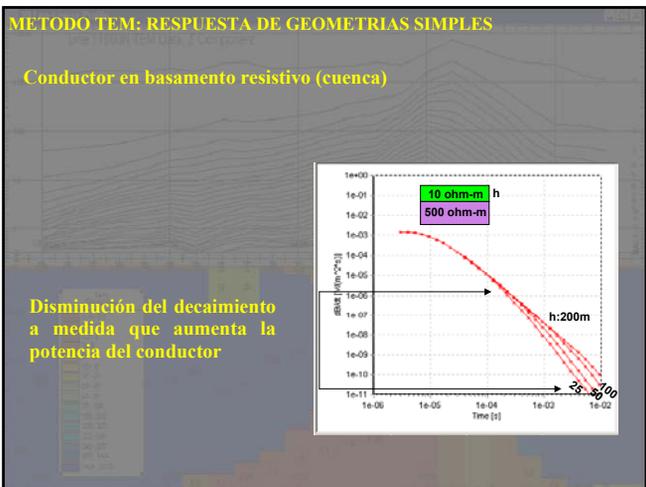


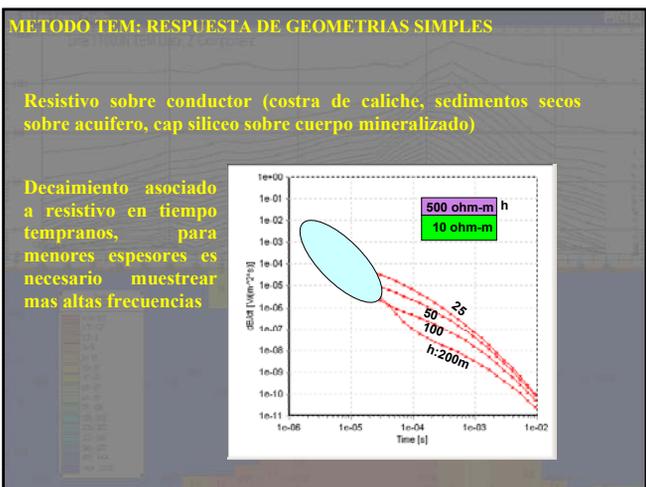
METODO TEM: REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

CURVAS DE DECAIMIENTO









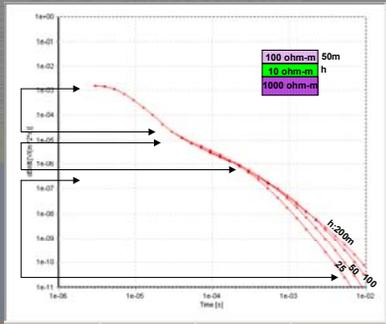
METODO TEM: RESPUESTA DE GEOMETRIAS SIMPLES

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 $h \gg$

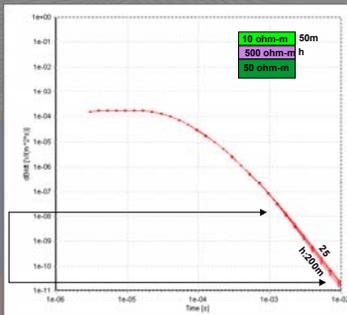
Decaimiento asociado a basamento, curvas paralelas expuestas en mayores tiempos tardíos para $h \gg$



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
