

Evaluación cuantitativa y espacial de campos EM de baja frecuencia en fantomas con vistas al estudio de su efecto en tejidos biológicos vivos

Laurent Bernard

GRUCAD

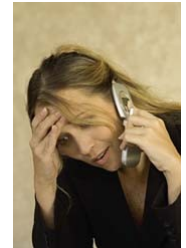
(Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos)

UFSC

(Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil)

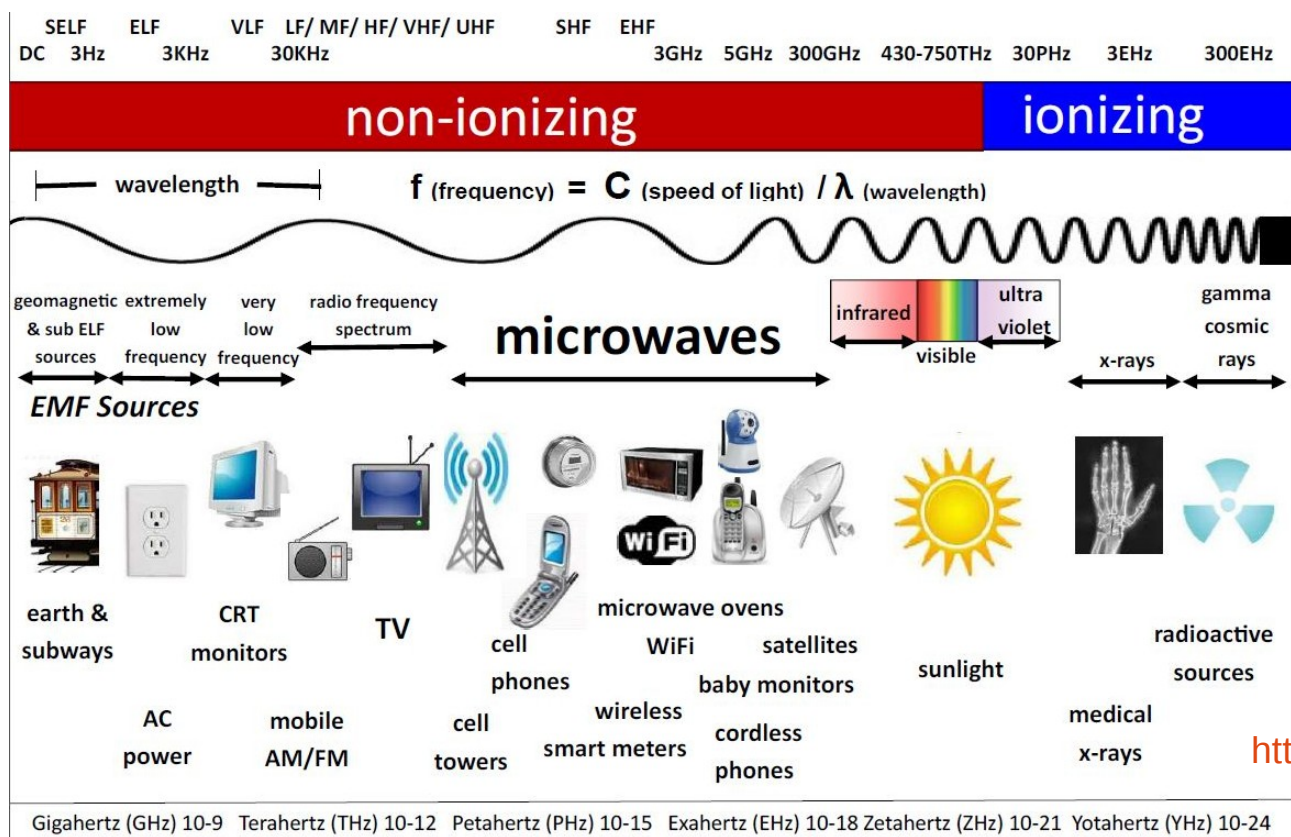
Exposición humana a campos electromagnéticos

- ♦ Propiedades electromagnéticas macroscópicas de los tejidos biológicos
 - ♦ Descripción
 - ♦ Modelos
 - ♦ Caracterización
- ♦ Campos electromagnéticos inducidos
 - ♦ Características
 - ♦ Fantomas
 - ♦ Evaluación numérica
- ♦ Recomendaciones internacionales
- ♦ Aplicación: sistema de recarga inductiva inalámbrica de vehículos eléctricos



Espectro electromagnético

- Bajas frecuencias
 - Grandes longitudes de onda
- Radiación no-ionizante
 - Ondas de radio, microondas, infrarrojo, luz visible
- Radiación ionizante
 - Ultravioletas, rayos X, rayos Gamma



<http://www.thecelltowers.org/>

Propiedades electromagnéticas de los tejidos biológicos

- Composición
 - 65-70% agua
 - Electrolitos biológicos, aminoácido, macromoléculas (proteínas)
 - Células: membrana, citoplasma, núcleo, orgánulos
- Propiedades macroscópicas

- **Susceptibilidad magnética** $\vec{M} = \chi_m \vec{H}$
 - Diamagnetismo / Paramagnetismo
 - MRI, SWI (susceptibility-weighted imaging)

- **Permitividad** $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$$

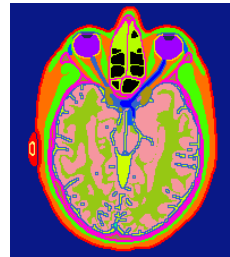
- **Conductividad** $\vec{J} = \sigma \vec{E}$

- No-linearidad
 - Fuerte no-linearidad en campos de alta intensidad
 - Linearidad para campos suficientemente bajos
- Anisotropia
 - Debida a la estructura microscópica (ejemplo: músculo)

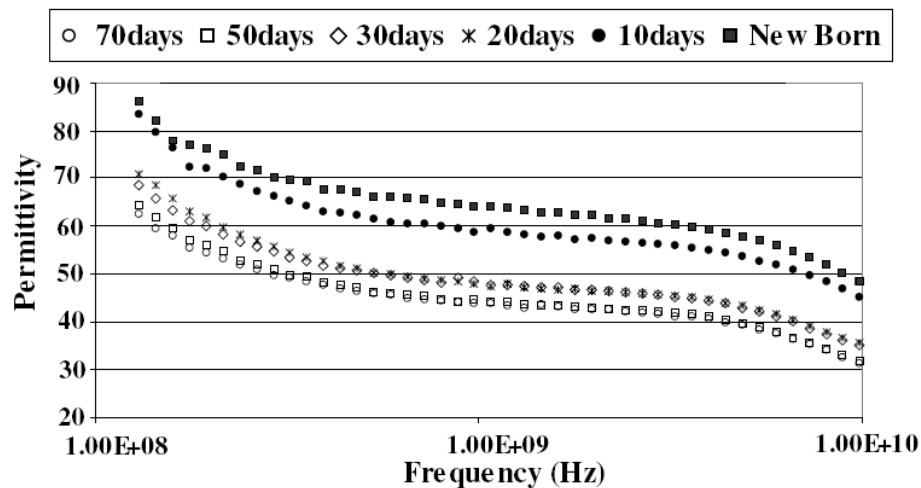
$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{H} &= \vec{J} + j\omega \vec{D} \\ \text{rot } \vec{H} &= j\omega \left(\epsilon' - j \left(\epsilon'' + \frac{\sigma}{\omega} \right) \right) \vec{E} \\ \text{rot } \vec{H} &= \left(\left(\sigma + \omega \epsilon'' \right) + j\omega \epsilon' \right) \vec{E} \end{aligned}$$

Variabilidad de las propiedades

- ♦ Heterogeneidad
 - ♦ Entre personas
 - ♦ Entre órganos

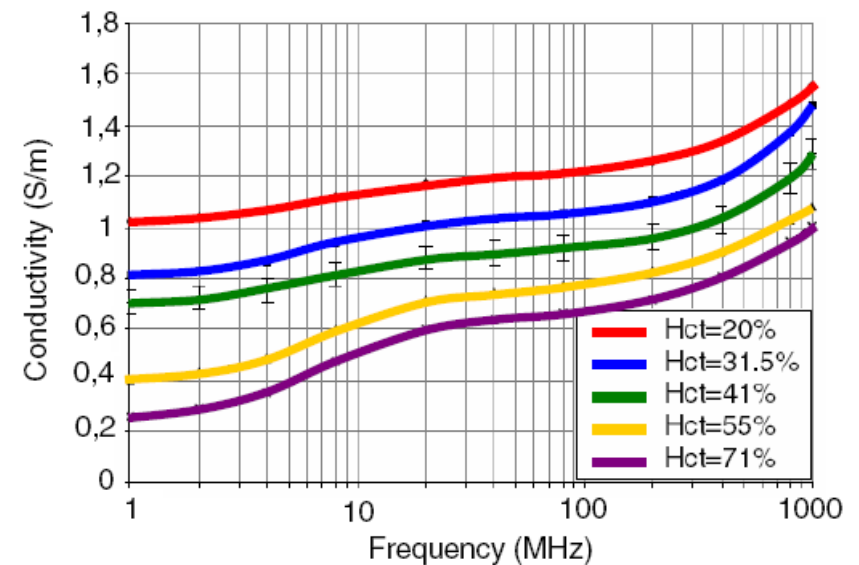


- ♦ Sensibilidad:
 - ♦ Temperatura, edad, hidratación, circulación sanguínea, estado fisiológico..



Relative permittivity of *skin* tissue from rats

[Peyman 2001]

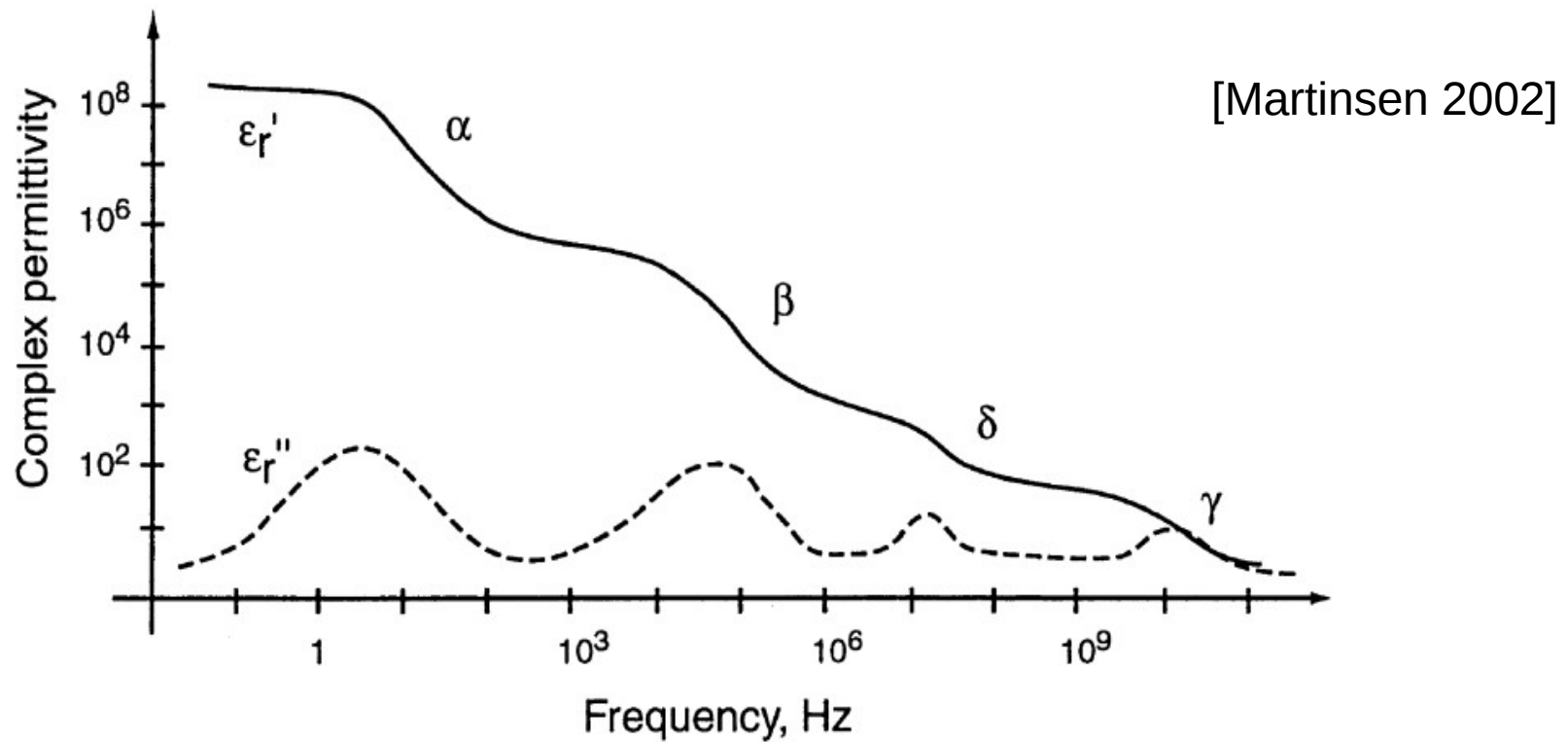


Conductivity of cow blood versus frequency for different haematocrit levels (*Hct*)

[Jaspard 2003]

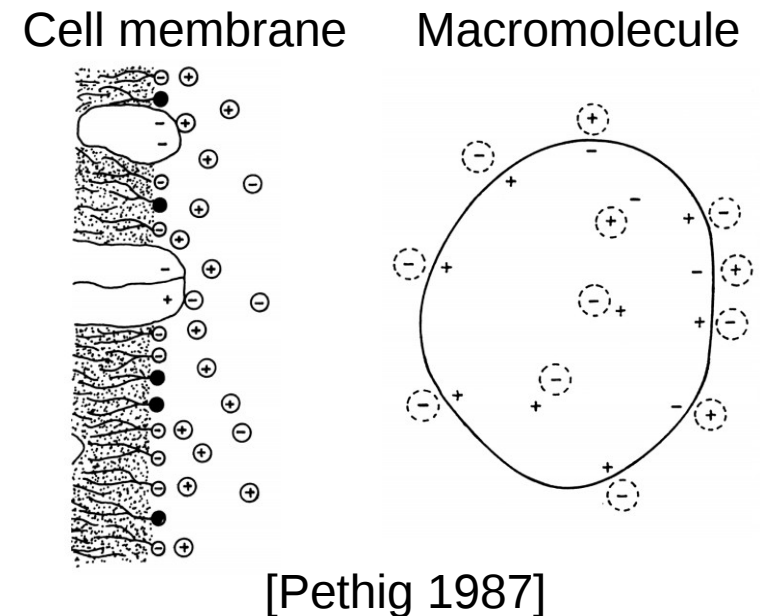
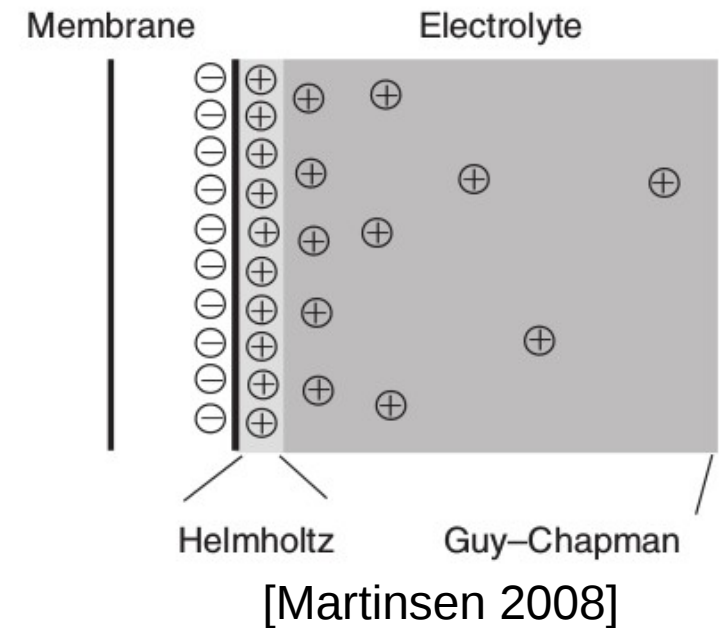
Permitividad eléctrica

- ♦ 4 principales relajaciones
 - ♦ α (baja frecuencia), β (radio frecuencia), γ (microondas), δ
 - ♦ Doble capa eléctrica de interfase
 - ♦ Moléculas polares
 - ♦ Interacciones químicas y electrostáticas



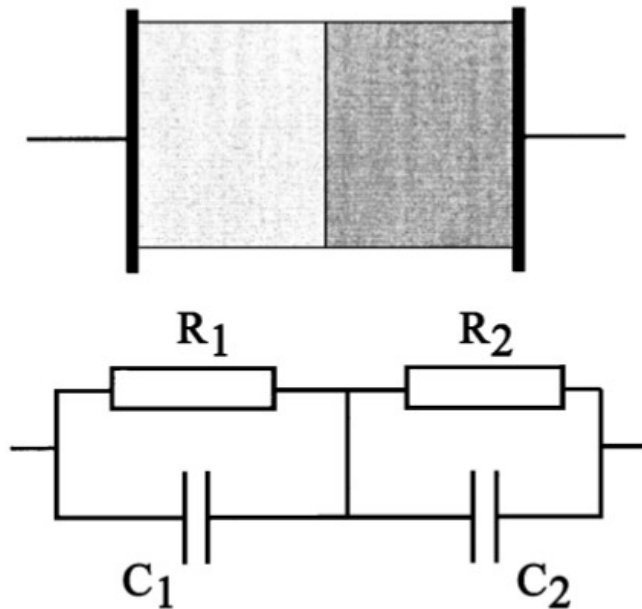
Doble capa eléctrica

- ♦ Interfase sólido / líquido iónico
- ♦ Doble capa:
 - ♦ Adsorción de iones y moléculas (interacción química)
 - ♦ Capa difusa, iones solvatados (fuerzas electrostáticas)
- ♦ Membrana celular
- ♦ Macromoléculas (proteínas, ADN)
- ♦ Grande tiempo de relajación
 - ♦ Proceso de difusión
- ♦ Dispersión α



Efecto Maxwell-Wagner

- ♦ Interfaz entre dieléctricos
- ♦ Ausencia de relajación en cada dieléctrico
- ♦ Cargas superficiales inducidas por conducción eléctrica
- ♦ Dispersión β



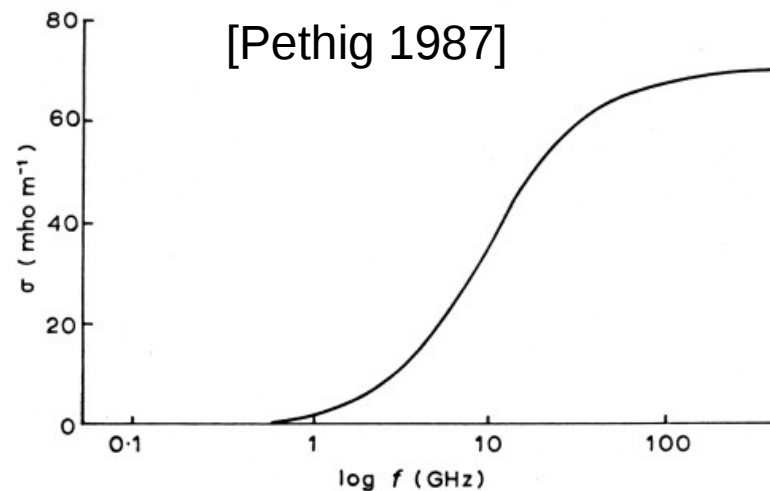
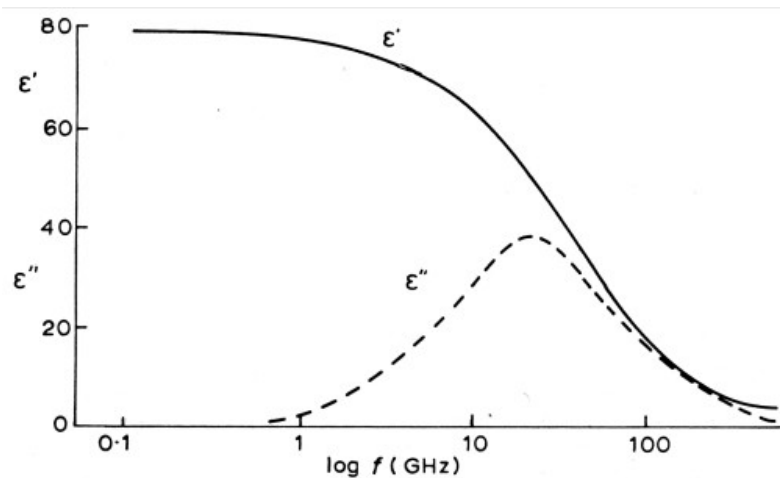
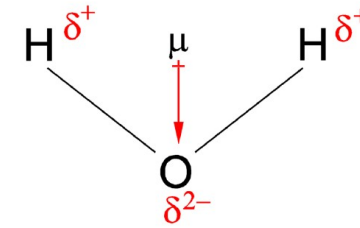
Resultant parallel capacitance limits:

$$C_p = (C_1 R_1^2 + C_2 R_2^2) / (R_1 + R_2)^2 \quad f \rightarrow 0$$

$$C_p = C_1 C_2 / (C_1 + C_2) \quad f \rightarrow \infty$$

Moléculas polares

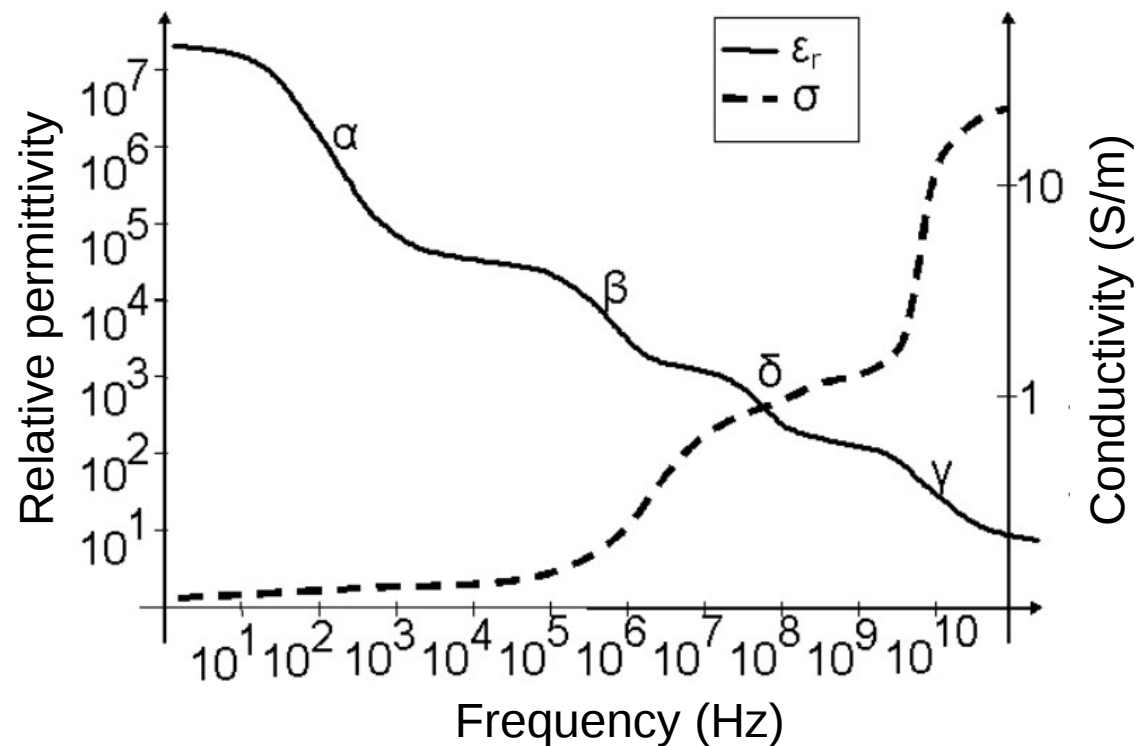
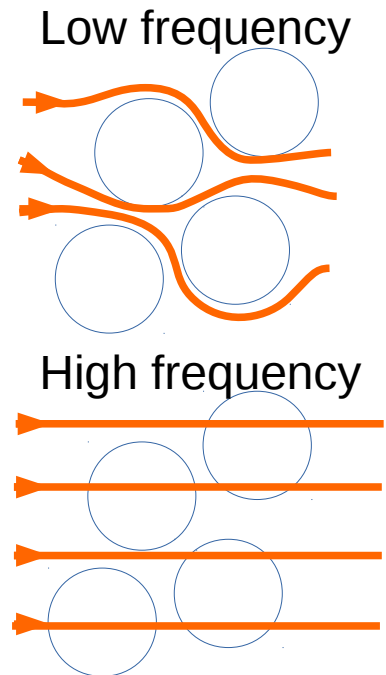
- Agua
 - 20°C, resonancia a 17.1GHz
 - 37°C, resonancia a 25 GHz => Dispersión y



- Otras moléculas: ácidos aminos, proteínas
- Interacciones electrostáticas entre dipolos, y con iones solvatados
 - Agua ligada a proteínas => Dispersión δ
- Contribución a la dispersión β (relajación rotacional de grandes macromoléculas)

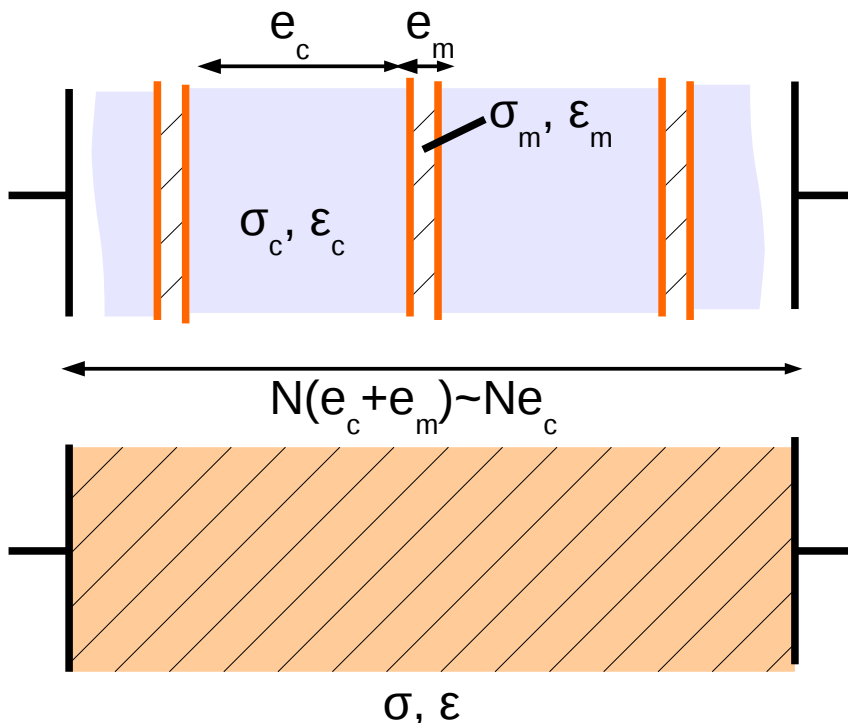
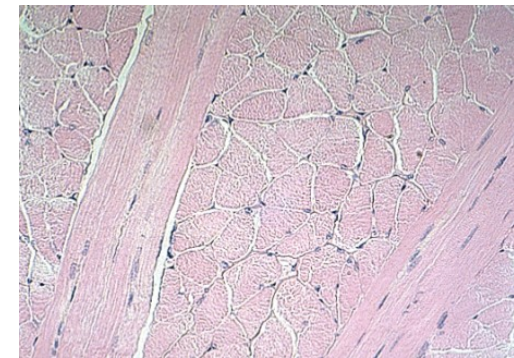
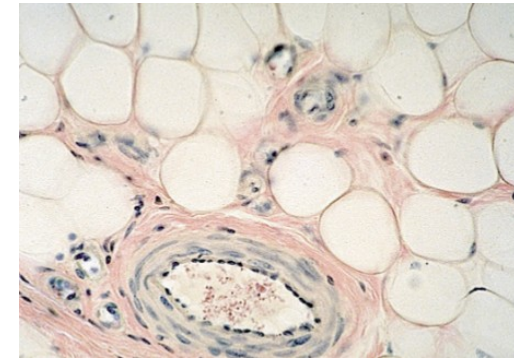
Conductividad eléctrica

- ♦ Conductividad iónica estática
 - ♦ Membranas casi aislantes
- ♦ Aumento con la frecuencia
 - ♦ Dispersión debida a relajaciones dieléctricas
 - ♦ Desaparición de la impedancia de membranas



Transición micro/macro en baja frecuencia

- ♦ Membranas finas y aislantes
 - ♦ Membrana: $e_m \sim 5 \text{ nm}$, $\sigma_m \sim 1 \mu\text{S/m}$, $\epsilon_m \sim 5 \epsilon_0$
- ♦ Grandes regiones de conducción iónica
 - ♦ Citoplasma: $e_c \sim 10 \mu\text{m}$, $\sigma_c \sim 0.1\text{S/m}$, $\epsilon_c \sim 50 \epsilon_0$



$$\frac{e_m}{e_c} \approx 5e - 4$$

$$f = 100 \text{ Hz}, \quad \frac{\|\sigma_m + j\omega\epsilon_m\|}{\|\sigma_c + j\omega\epsilon_c\|} \approx 1e - 5$$

$$\frac{\|\sigma_m + j\omega\epsilon_m\|}{\|\sigma_c + j\omega\epsilon_c\|} \ll \frac{e_m}{e_c} \ll 1$$

Transición micro/macro en baja frecuencia

- Campo macroscópico:

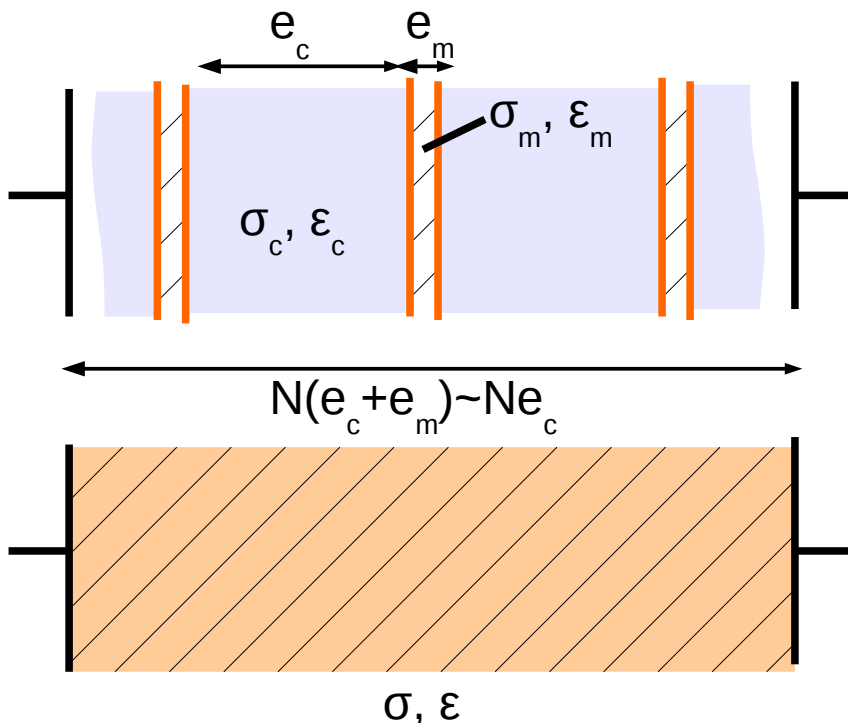
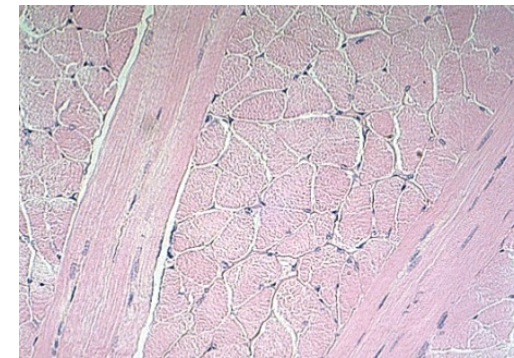
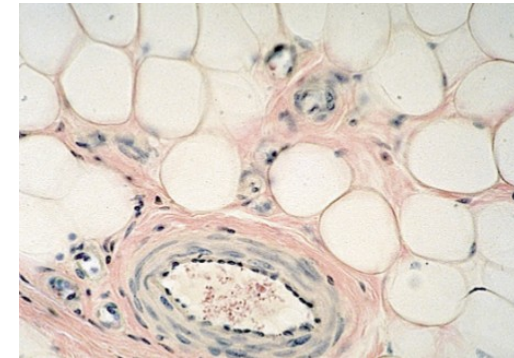
$$\vec{E}N(e_c + e_m) = \vec{E}_c N e_c + \vec{E}_m N e_m$$

- Conservación de la carga eléctrica:

$$(\sigma_c + j\omega\epsilon_c) \vec{E}_c = (\sigma_m + j\omega\epsilon_m) \vec{E}_m$$

=> heterogeneidad del campo a la escala celular

=> grandes valores de permitividad en baja frecuencia



$$\vec{E} = \frac{1}{1 + \frac{e_m}{e_c}} \left(\frac{\sigma_m + j\omega\epsilon_m}{\sigma_c + j\omega\epsilon_c} + \frac{e_m}{e_c} \right) \vec{E}_m$$

$$\epsilon \approx \frac{e_c}{e_m} \epsilon_m$$

$$\vec{E}_m \approx \frac{e_c}{e_m} \vec{E}$$

Modelos de relajación dieléctrica

- Especie única: modelo de Debye
 - **Tiempo de respuesta del desplazamiento**
 - **=> dependencia en frecuencia**

$$D(t) = D_{\infty} + \frac{D_0 - D_{\infty}}{1 - e^{t/\tau_c}}$$

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \frac{\Delta\epsilon}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}} \quad \Delta\epsilon = \epsilon_s - \epsilon_{\infty}$$

- Especies múltiples: modelo de Cole-Cole
 - **diferentes escalas y fenómenos => diferentes tiempos de relajación**

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \sum_n \frac{\Delta\epsilon_n}{1 + \left(j\frac{\omega}{\omega_n}\right)^{1-\alpha_n}}$$

- Dependencia en frecuencia de la conductividad

$$\sigma = \sigma_s + \omega\epsilon''$$

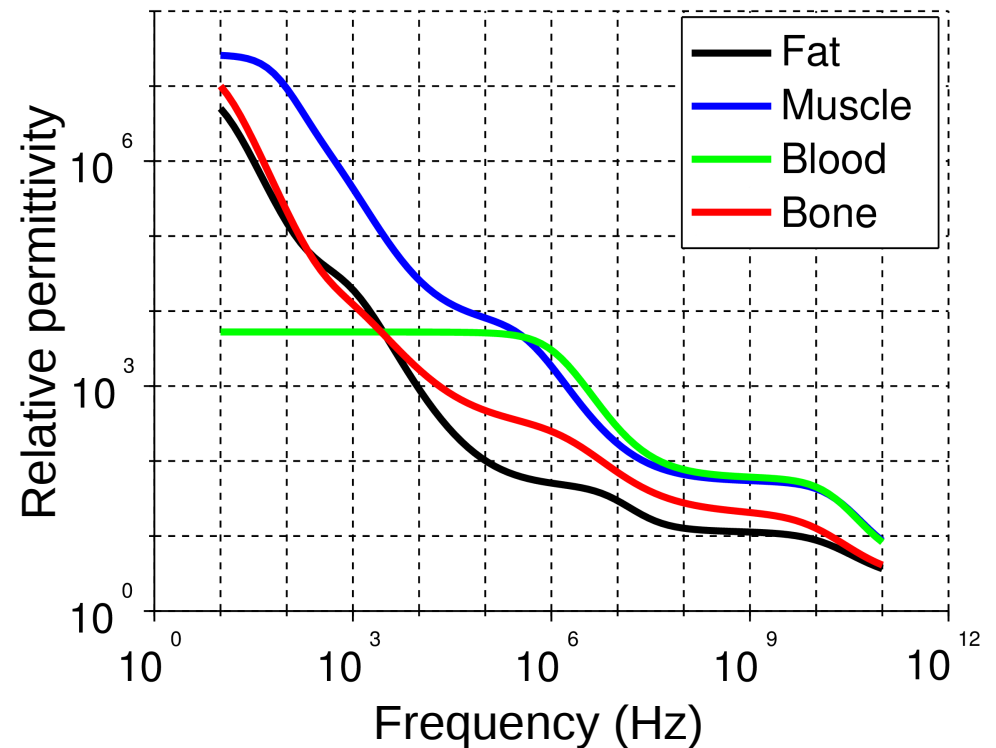
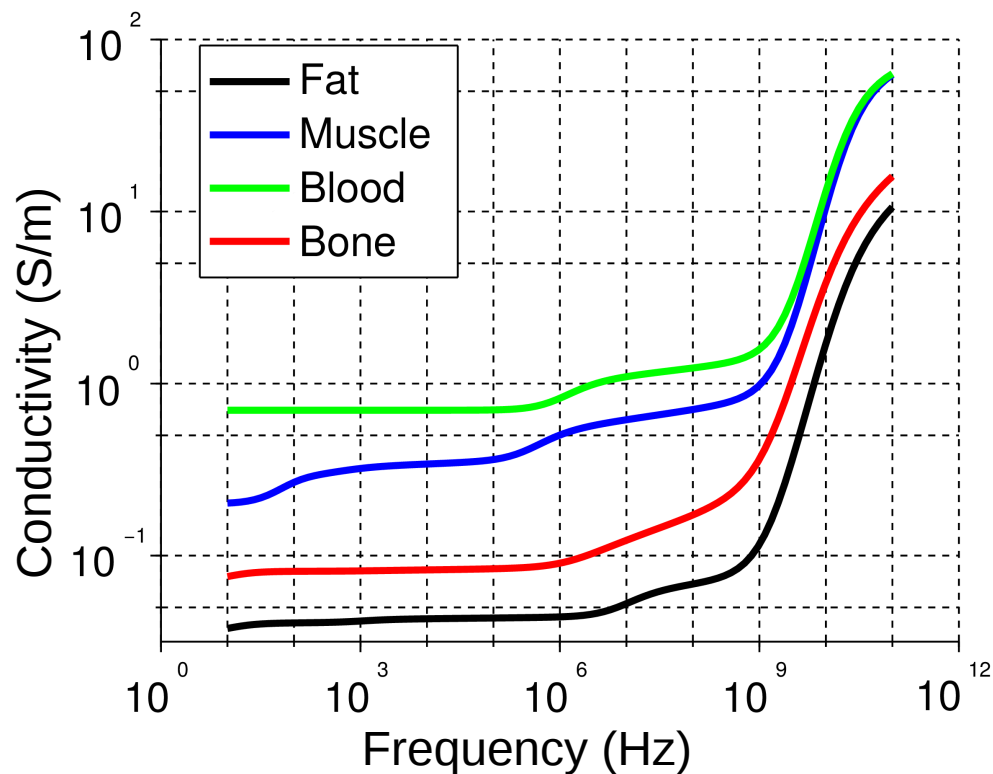
- Relaciones de Kramers-Kronig entre parte real y imaginaria de la permitividad (causalidad, ausencia de respuesta en frecuencia infinita):

- **El conocimiento de la parte real es suficiente para definir el comportamiento**

- $\Delta\sigma_n = \omega_n \Delta\epsilon'_n$

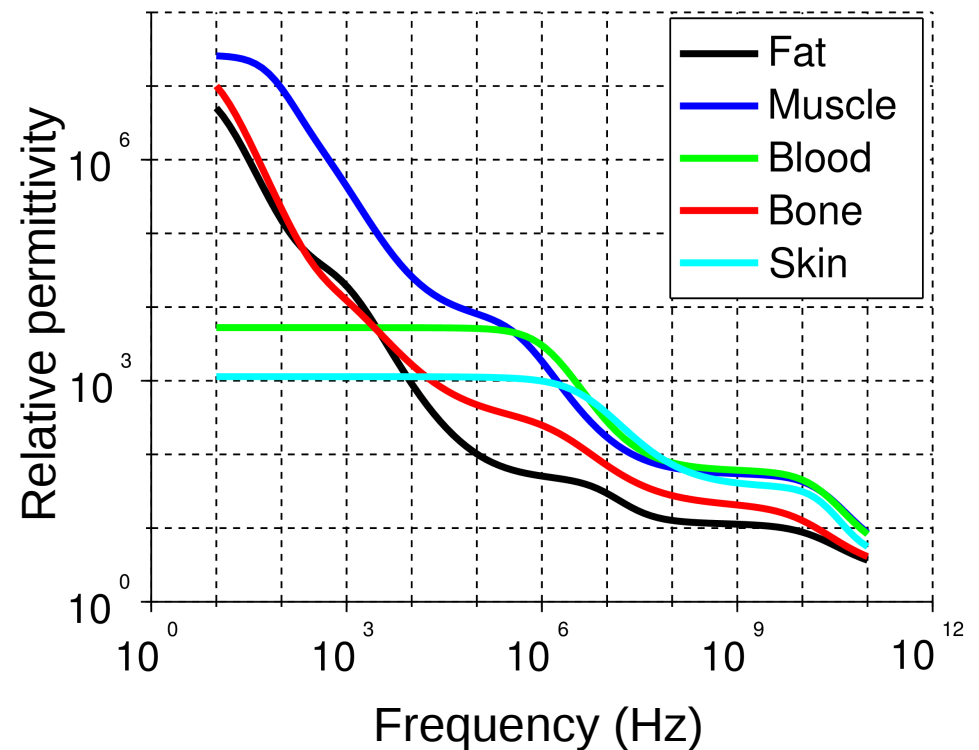
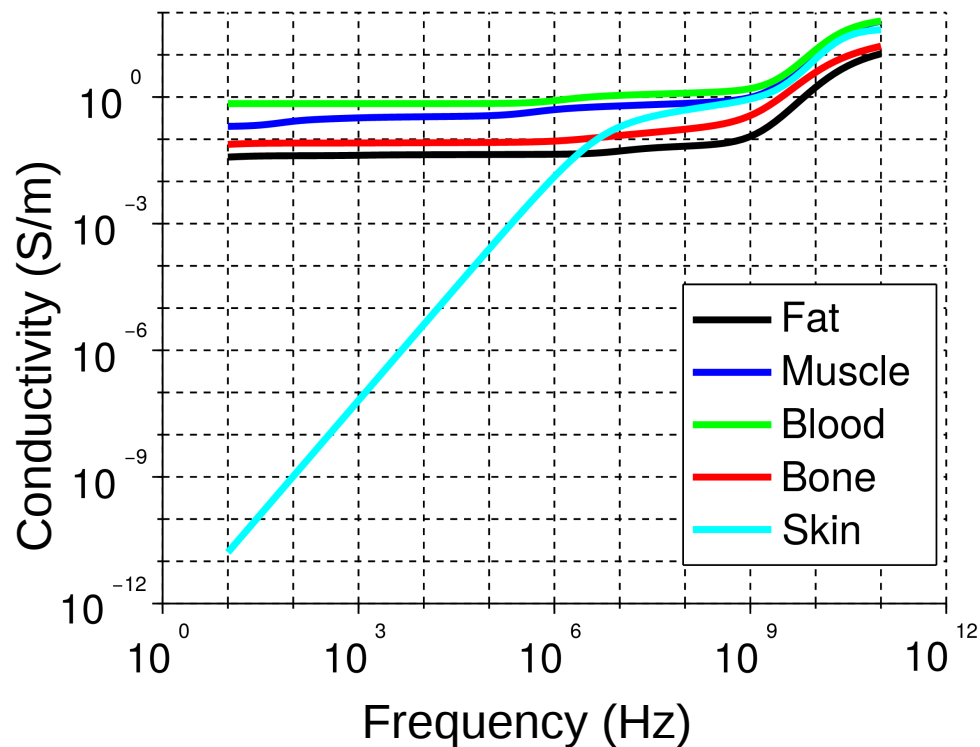
Propiedades de los tejidos humanos

- ♦ Modelo de Cole-Cole
 - ♦ Parámetros identificados a partir de medidas
 - ♦ Fuente IFAC (instituto de física aplicada, Italia) [Gabriel 1996]



Propiedades de los tejidos humanos

- ◆ Modelo de Cole-Cole
 - ◆ Parámetros identificados a partir de medidas
 - ◆ Fuente IFAC (instituto de física aplicada, Italia) [Gabriel 1996]



Caracterización de las propiedades electromagnéticas

- **Escala celular:** [Frenea-Robin 2009]

- **Magnetoforesis**

$$\vec{F} = \frac{(\chi_p - \chi_m)}{2\mu_0} V_p \vec{\nabla} B^2$$

- **Dielectroforesis (1kHz-10MHz)**

$$\vec{F} = 2\pi \varepsilon_m R^3 \operatorname{Re}[K(\omega)] \vec{\nabla} E_{rms}^2$$

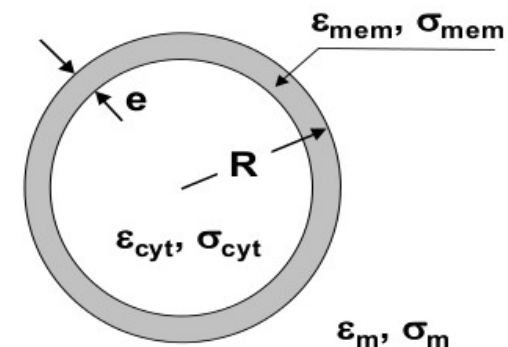
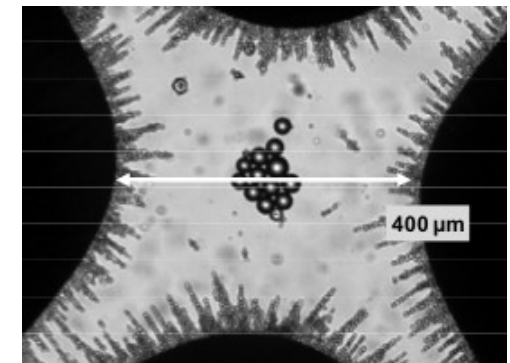
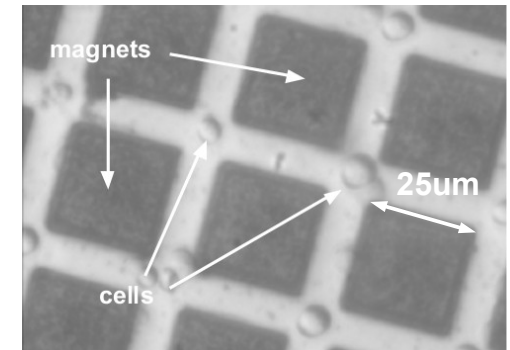
Clausius Mossotti factor:

$$K(\omega) = \frac{\varepsilon_p^* - \varepsilon_m^*}{\varepsilon_p^* + 2\varepsilon_m^*}$$

- **Electrorotación (1kHz-10MHz)**

$$\vec{\Gamma} = -4\pi \varepsilon_m R^3 \operatorname{Im}[K(\omega)] E^2$$

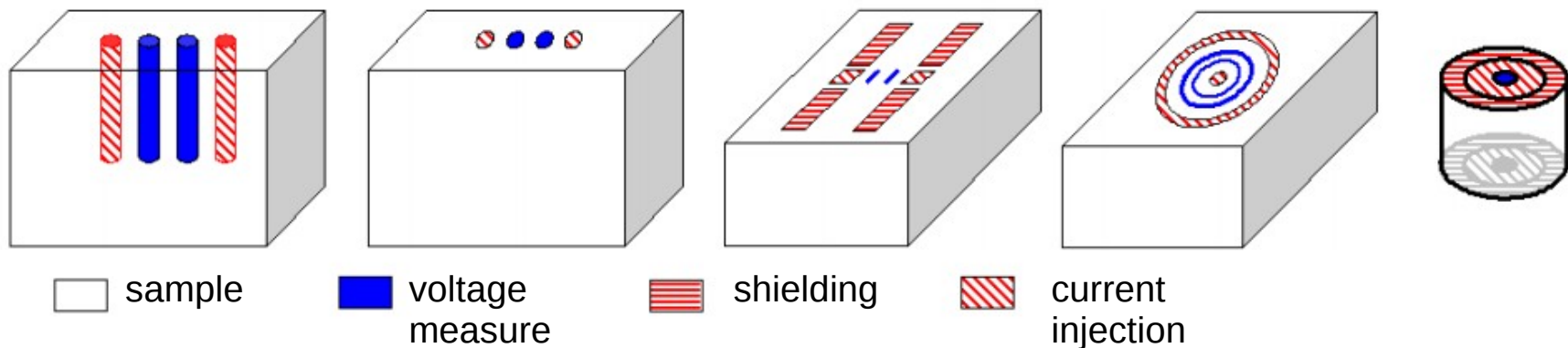
- **Relación velocidad / fuerza / viscosidad**
- **Identificación de los parámetros del modelo**



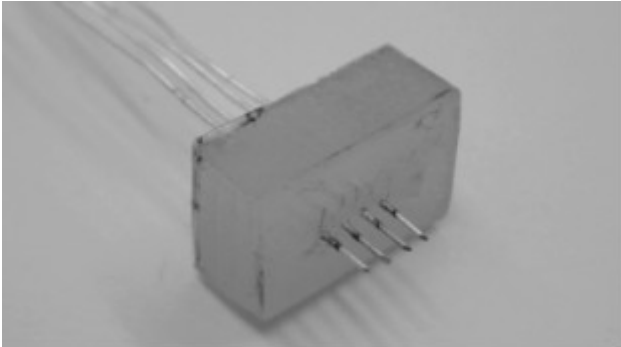
$$\varepsilon_p^* = \frac{R \varepsilon_{men}^* \varepsilon_{cyt}^*}{R \varepsilon_{men}^* + e \varepsilon_{cyt}^*}$$

Caracterización de las propiedades electromagnéticas

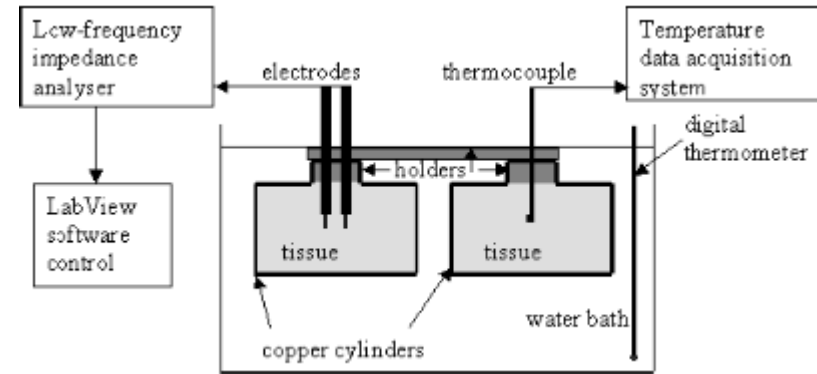
- ♦ Propiedades macroscópicas (escala del tejido):
 - ♦ 2 electrodos y analizador de impedancias ($10\text{kHz} < 100\text{MHz}$)
 - ♦ 4 electrodos y analizador de impedancias ($< 100\text{MHz}$)
 - ♦ Sensor superficial (contacto)
 - ♦ Sensor con agujas (invasivo)
 - ♦ Guía de onda ($100\text{MHz} - 20\text{GHz}$)
 - ♦ Espectroscopia por inducción magnética



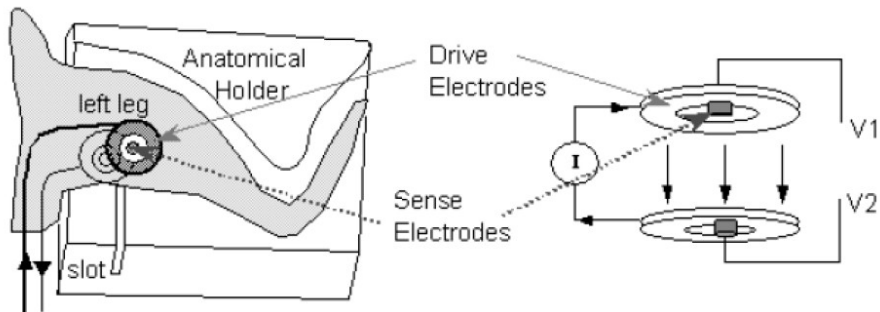
Ejemplos de sensores



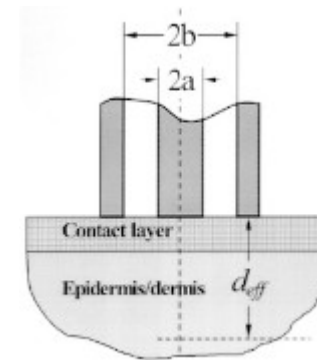
D.Haemmerich et al., In vivo electrical conductivity of hepatic tumours, 2003



Mihaela Pop et al., Changes in dielectric properties at 460 kHz of kidney and fat during heating, 2003



K Sunshine Osterman et al., Non-invasive assessment of radiation injury with electrical impedance spectroscopy 2004



V.Raicu et al., A quantitative approach to the dielectric properties of the skin, 2000

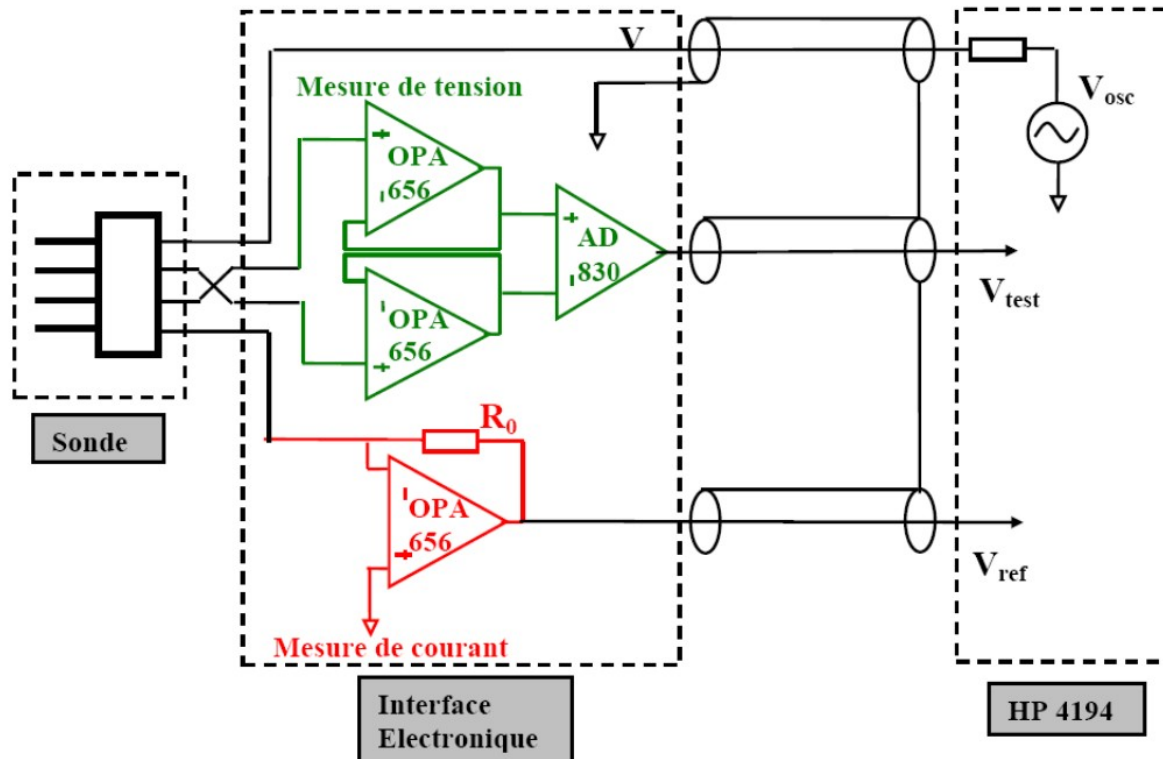
Dificultades en el proceso de caracterización

- ♦ Caracterización *in vivo* muy limitada
 - ♦ **lengua, piel**
- ♦ Caracterización *in vitro*
 - ♦ **Condicionamiento del tejido extraído**
 - ♦ **Conjunto de muestras “idénticas”**
 - ♦ **Variación de las propiedades post mortem**
 - ♦ Degradación de la estructura celular
 - ♦ Circulación sanguínea
 - ♦ Hidratación
 - ♦ Temperatura
- ♦ **Sensores invasivos (agujas)**
- ♦ **Tamaño de la muestra**
 - ♦ **Homogeneidad macroscópica, anisotropía**
 - ♦ **Volumen medido dependiente de la frecuencia**
- ♦ **Impedancia de interfase en baja frecuencia (<100kHz)**
 - ♦ **Interfaz electrodo/muestra (polarización de electrodo)**
 - ♦ **Impedancia muy grande en baja frecuencia**

$$\underline{Z}_i = K(j\omega)^{-\alpha} \quad 0 < \alpha < 1$$

Ejemplo: sensor 4 electrodos

- Sensor / condicionamiento de la señal / osciloscopio



- Impedancia medida:

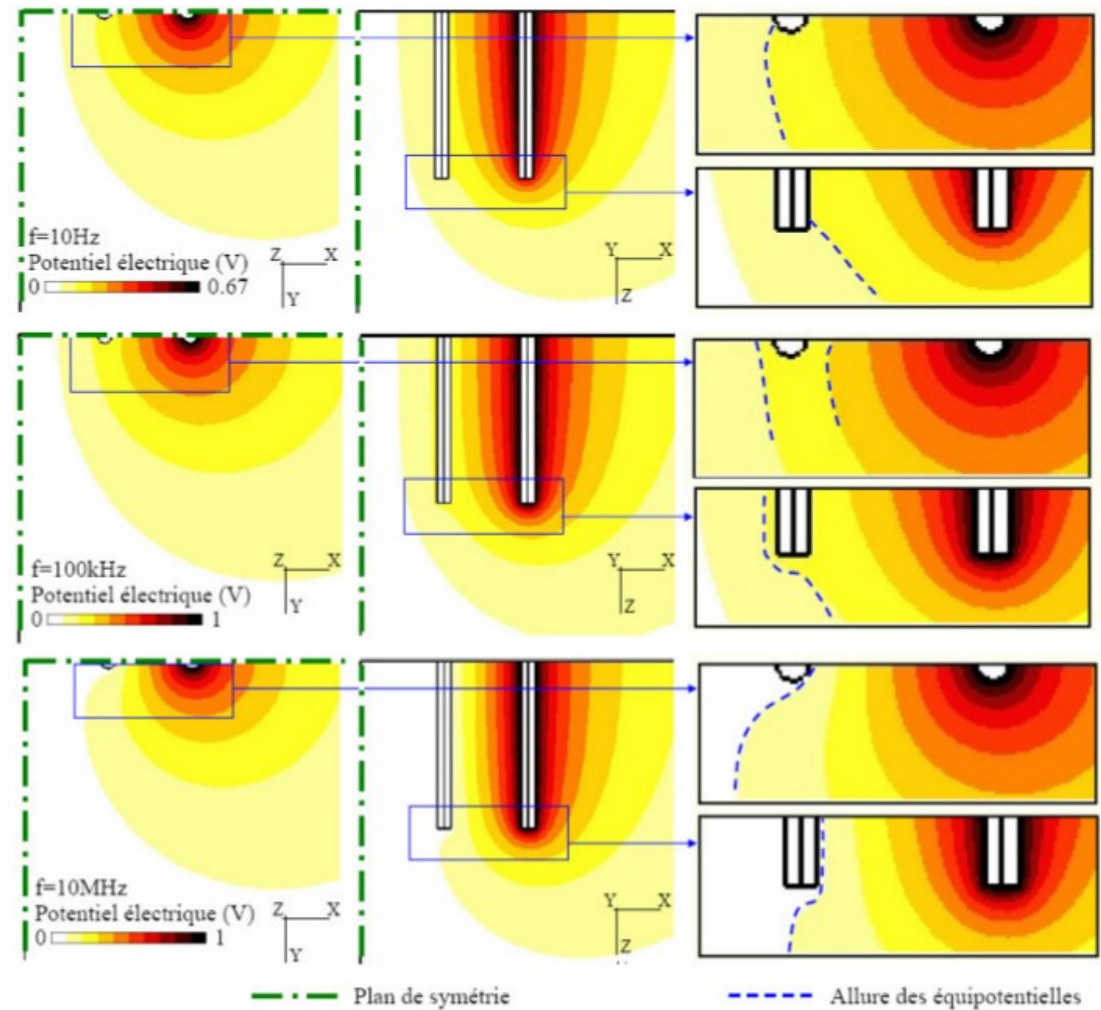
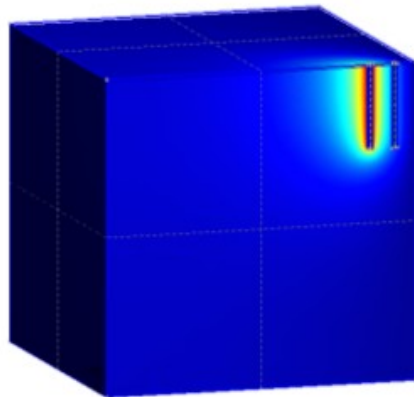
- **coeficiente geométrico del sensor**
- **Propiedades eléctricas**

$$\underline{Z}_{4e} = \frac{V_{test} R_0}{V_{ref}} = \frac{C_{4e}}{(\sigma + j\omega\epsilon)}$$

Ejemplo: sensor 4 electrodos

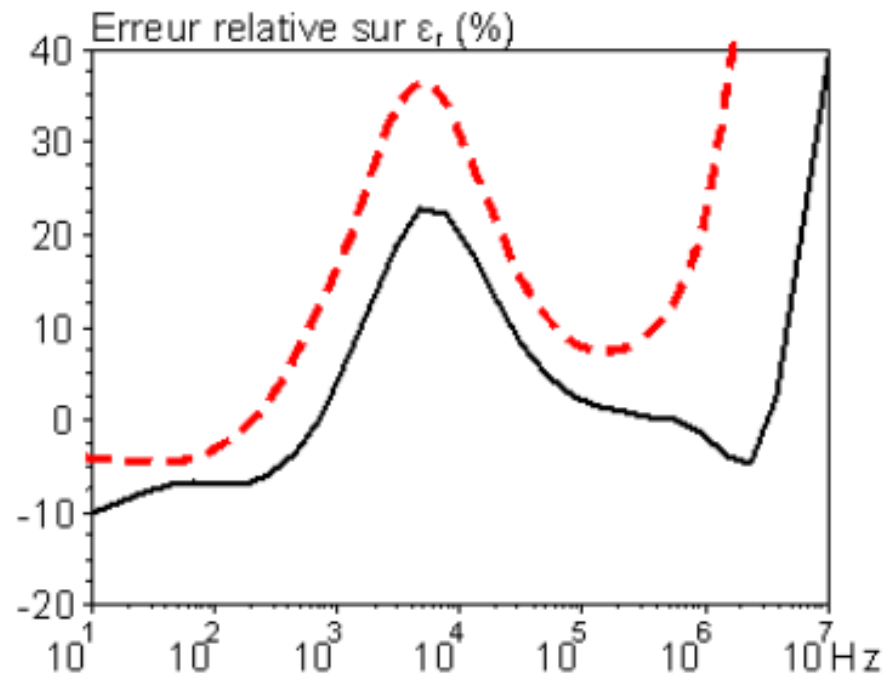
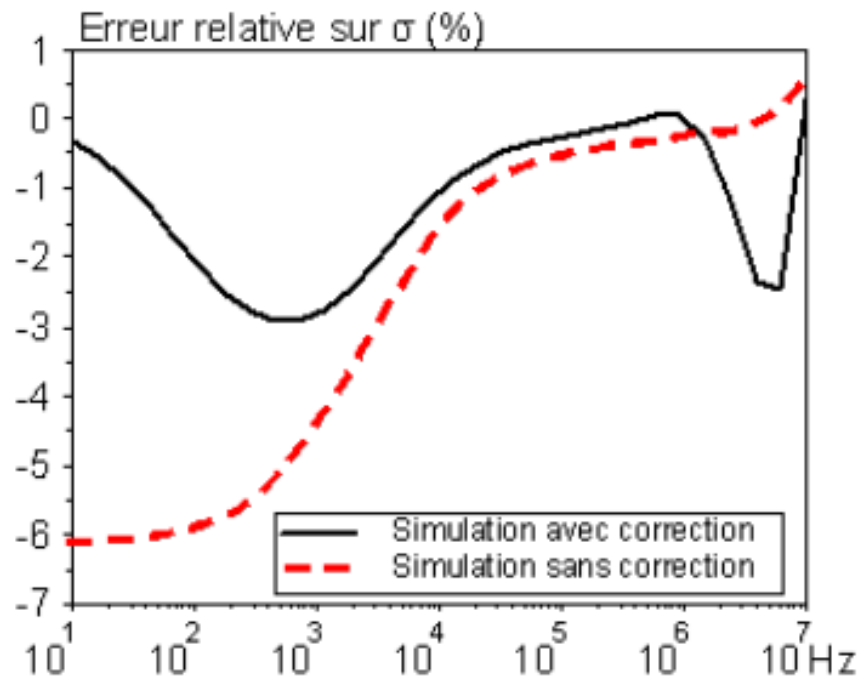
- 4 agujas de platino
- Medidas en soluciones de KCl
- Evaluación de la impedancia de superficie a partir de medidas 2-electrodos
- Permitividad y conductividad constantes (10Hz-100kHz)

Solution	$\sigma(S/m)$	ϵ_r
KCL0001	0.0136	81.4
KCL0002	0.027	81.4
KCL0005	0.0637	81.4
KCL001	0.129	81.4
KCL002	0.248	81.4
KCL005	0.556	81.4



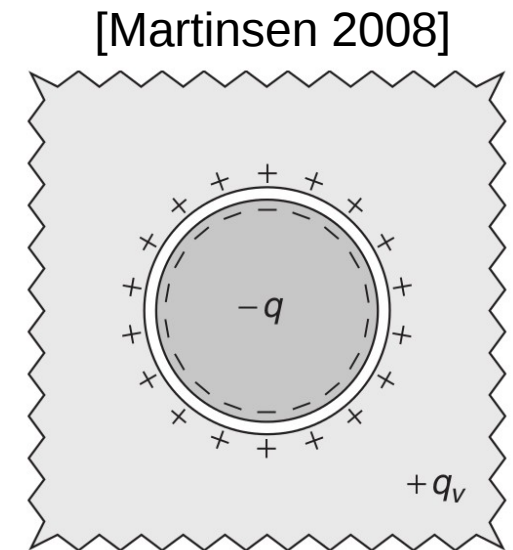
Ejemplo: sensor 4 electrodos

- ♦ Modelo de sistema y de proceso de medición
- ♦ La calibración no remueve el error debido a la impedancia superficial
- ♦ Evaluación del error sistemático debido a la impedancia superficial



Campos eléctricos endógenos

- Células pasivas: poco polarizadas
- Células activas: nervios, músculos, glándulas
- Células excitables
 - **-40 a -90mV dentro de la célula con respecto al medio externo**
 - **Impulsos de 1 ms**
 - **Bombas iónicas en la membrana**
- Campo eléctrico en la membrana y en las regiones de capa doble
- Ruido en el campo eléctrico:
 - **Ruido de origen térmico (TMP ~3uV, campo ~150V/m)**
 - **Ruido “shot”**
 - **Ruido 1/f (TMP ~10uV, campo ~500V/m)**
- Piezoelectricidad



Campo electromagnético inducido

- Ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= -j\omega \vec{B} \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{J} + j\omega \vec{D} \end{aligned}$$

- Relaciones constitutivas

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

- Onda plana en medio homogéneo isotrópico linear

- Longitud de onda

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} / \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} + 1 \right)}$$

- Profundidad de penetración

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \omega \mu}} \sqrt{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega \epsilon}{\sigma} \right)^2} + \frac{\omega \epsilon}{\sigma}}$$

- Densidad de potencias disipada por efecto Joule (W/m^3), medio conductor isotrópico linear

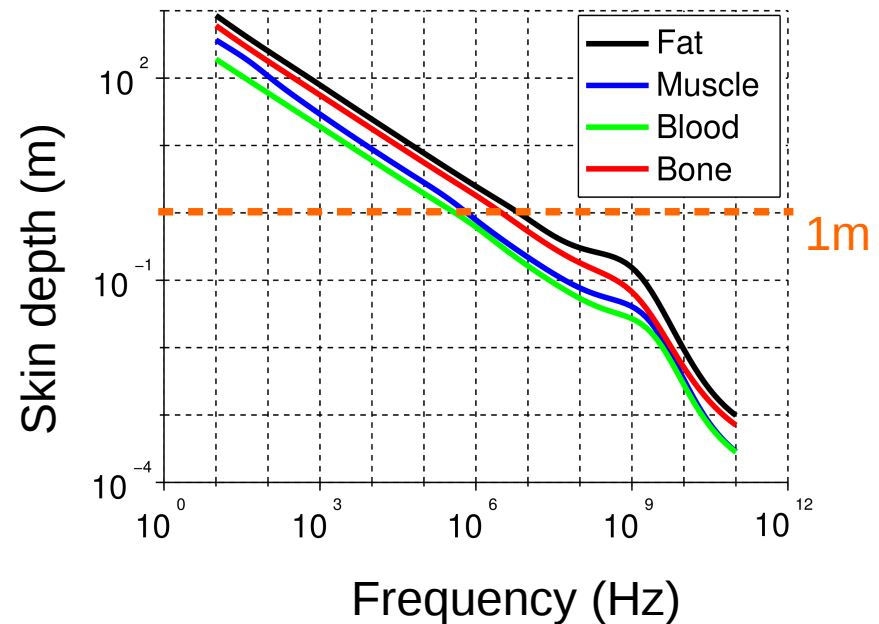
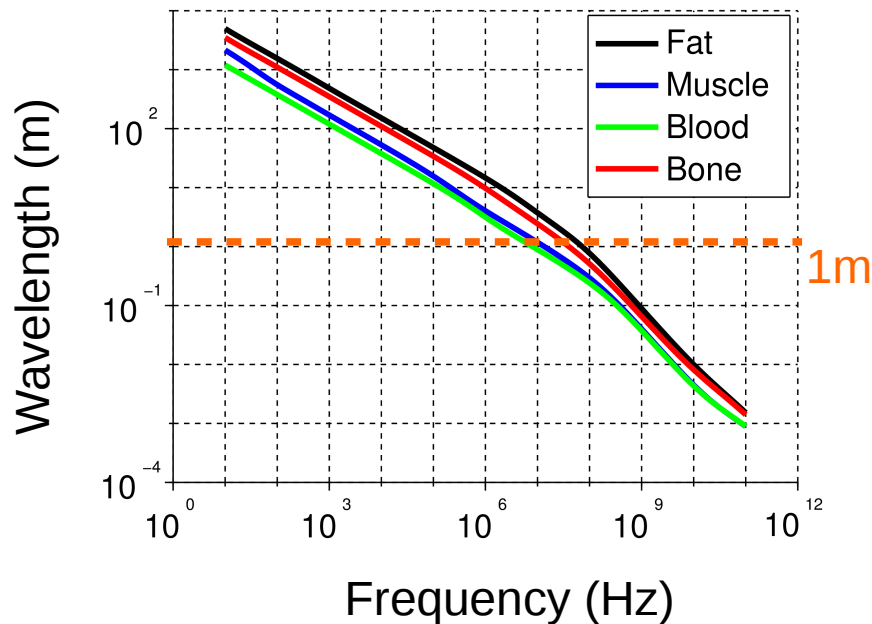
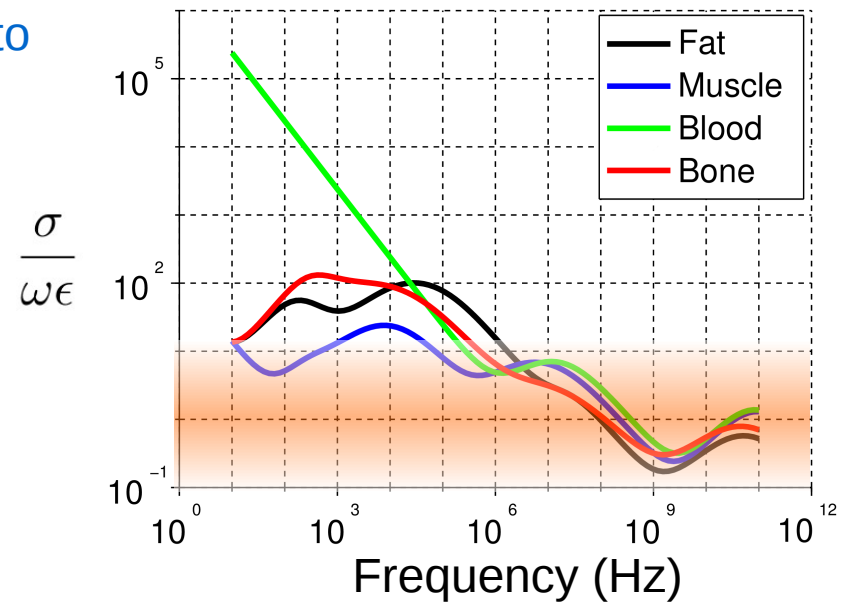
$$p = \sigma \|\vec{E}\|^2$$

- Tasa de absorción específica (SAR, W/kg), medio conductor isotrópico linear

$$SAR = \frac{1}{V} \int_V \frac{\sigma \|\vec{E}\|^2}{\rho} dV$$

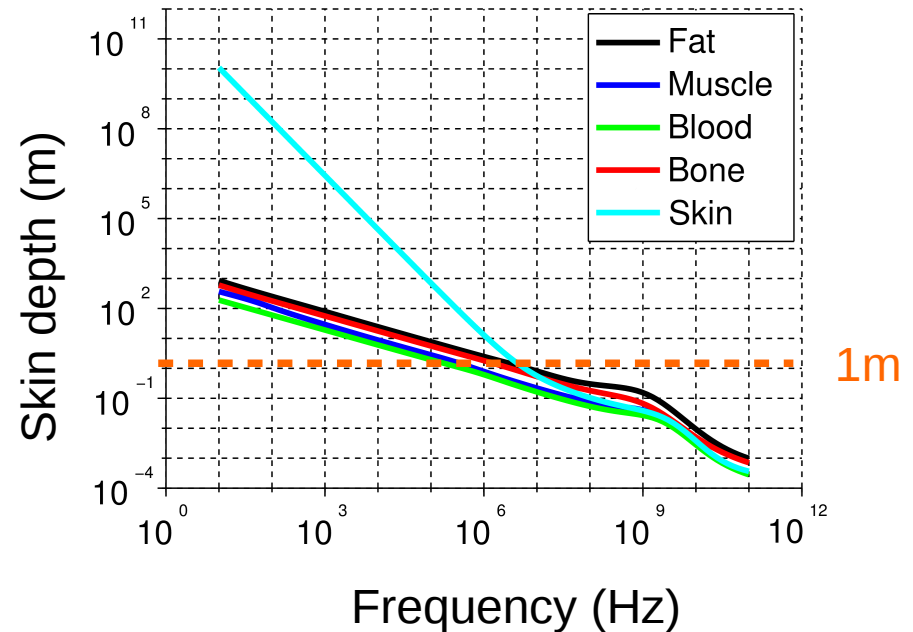
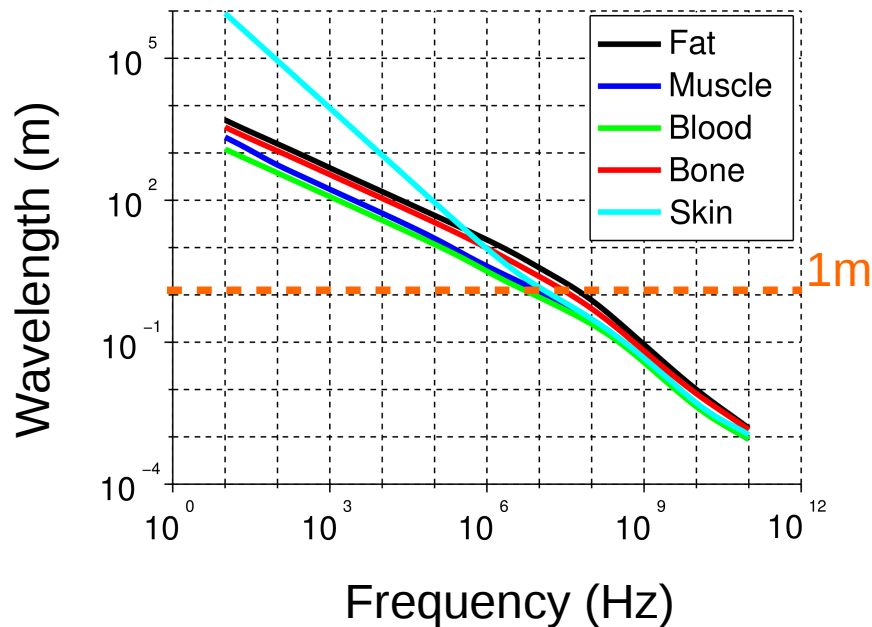
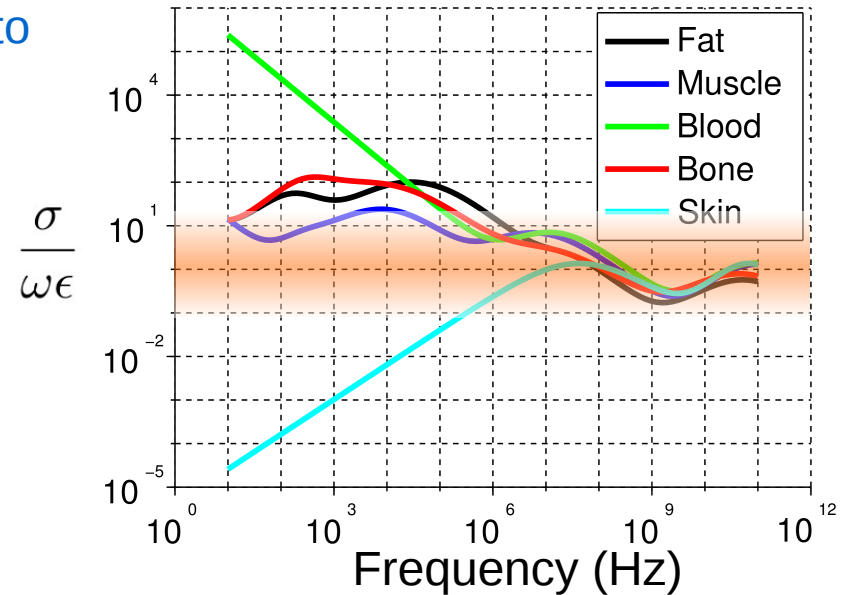
Campo electromagnético inducido

- Corriente de conducción y desplazamiento
- Propagación para $f > 10\text{MHz}$
 - Transmisión / reflexión entre órganos
- Atenuación
 - A partir de $f > 100\text{kHz}$
 - Para $f = 100\text{GHz}$, $\delta < 1\text{mm}$



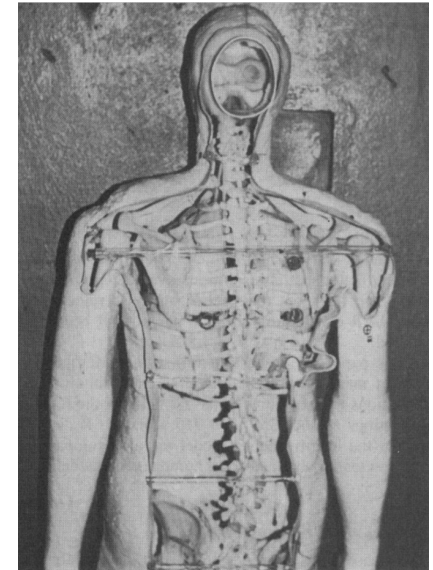
Campo electromagnético inducido

- Corriente de conducción y desplazamiento
- Propagación para $f > 10\text{MHz}$
 - Transmisión / reflexión entre órganos
- Atenuación
 - A partir de $f > 100\text{kHz}$
 - Para $f = 100\text{GHz}$, $\delta < 1\text{mm}$

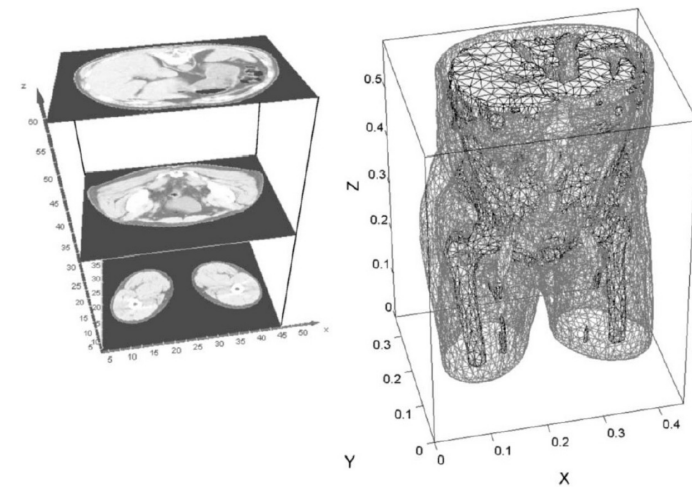


Campo electromagnético inducido

- ♦ Medición *in vivo* muy limitadas
 - ♦ animales
- ♦ Fantomas físicos
 - ♦ **Mezclas complejas:**
 - ♦ Agar, agua desionizada, chloruro sódico
 - ♦ Polietileno en polvo, emulsión de silicona, glycerol, TX-151...
 - ♦ **Generalmente homogéneos (2/3 músculo)**
 - ♦ **Propiedades eléctricas similares**
 - ♦ **Banda de frecuencias limitada (100-5000 MHz)**
 - ♦ **Fuentes real o reproducidas en laboratorio**
- ♦ Fantomas numéricos
 - ♦ **Geometría realista proveniente de IRM**
 - ♦ **Propiedades macroscópicas de los órganos**
 - ♦ **Geometrías articuladas**
 - ♦ **Modelo de la fuente o del campo fuente**
 - ♦ **Diferentes métodos y formulaciones**
 - ♦



[Stuchly 1987]

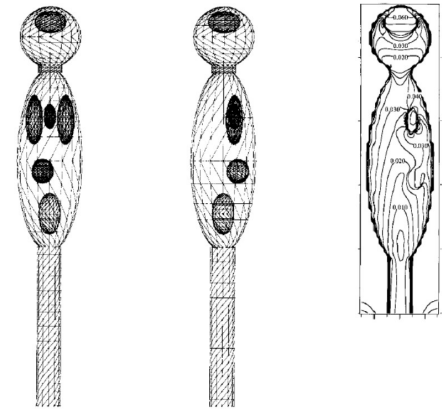


[Scorretti 2004]

Modelos numéricos de exposición

- ♦ Métodos numéricos

- ♦ Método de momentos
- ♦ Diferencias finitas
- ♦ Elementos finitos



[Yamazaki 2001]

- ♦ Formulaciones

- ♦ Baja frecuencia

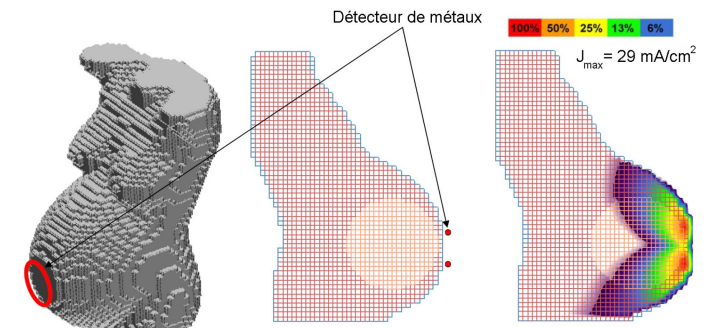
- ♦ Problemas magnético y eléctrico desacoplados
- ♦ Electrostática o casi estática
- ♦ Magnetodinámica

- ♦ Alta frecuencia: ecuaciones de Maxwell

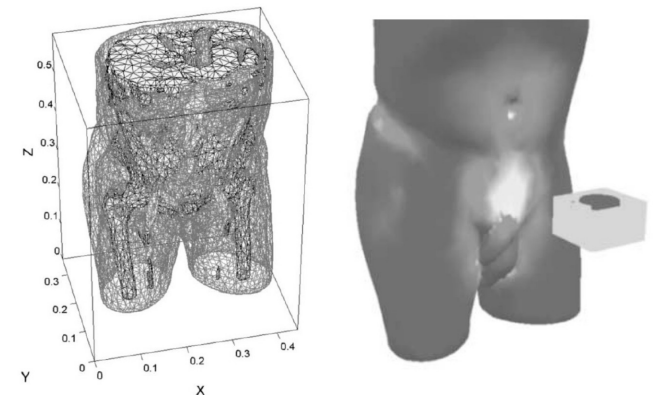
- ♦ SAR
- ♦ Acoplamiento térmico

- ♦ Particularidades

- ♦ Corriente de desplazamiento importante
- ♦ Selección de la formulación adecuada



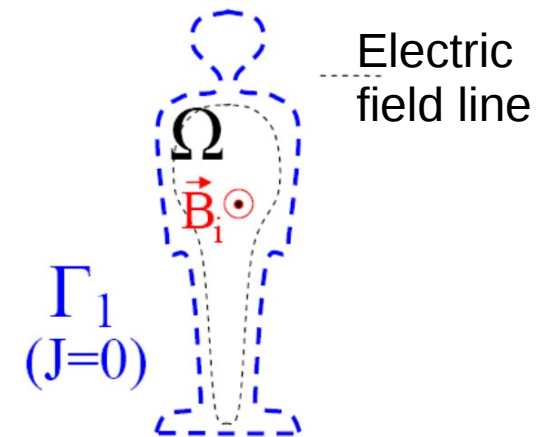
[Kainz 2003]



[Scorretti 2004]

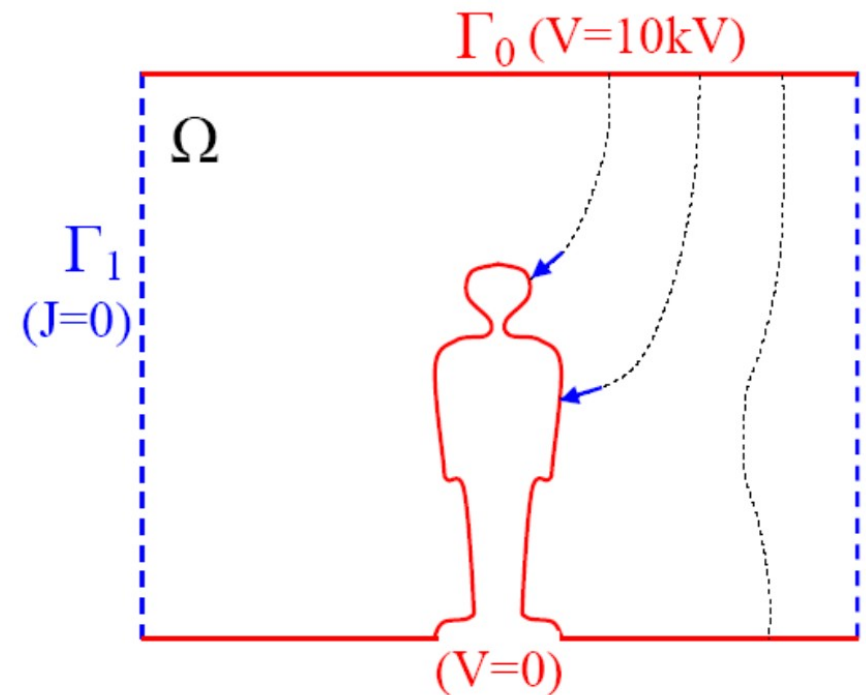
Campos magnéticos de baja frecuencia

- Alta corriente, bajo voltaje
- Corriente inducida de baja intensidad y propiedades paramagnéticas / diamagnéticas
 - => campo fuente poco alterado
- Lazos de corriente inducida
- Fuentes:
 - **Lineas de transmisión de alta corriente (DC 20 uT)**
 - **Calentamiento por inducción**
(dispositivo domestico: 20-50kHz, algunos uT a 10cm)
 - **Dispositivos domésticos 1uT a 50cm**
 - **Transmisión de potencia inalámbrica (celulares, vehículos)**
 - **Detector de metales**
 - **Resonancia magnética (movimiento, circulación sanguínea) 10T**
 - **Campo magnético terrestre: 30 a 70 uT**
 - **Trenes con levitación magnética (100 uT dentro del tren, algunos mT en el piso)**
 - **Imanes permanentes : campos local hasta 0.5mT**



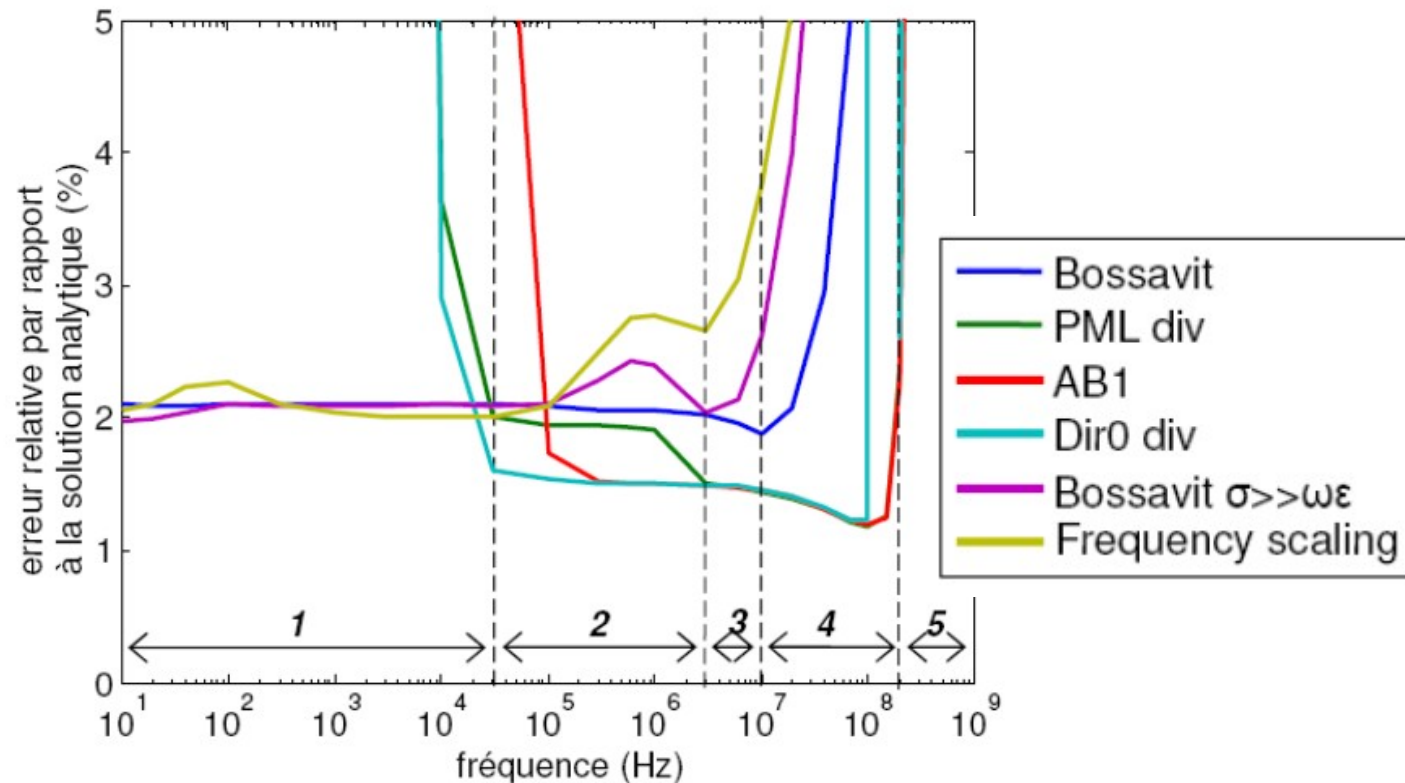
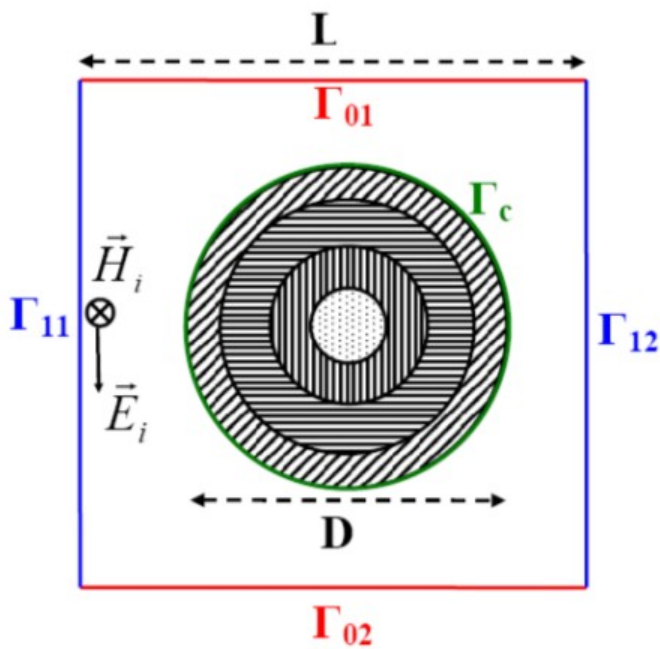
Campos eléctricos de baja frecuencia

- Alto voltaje, baja corriente
- Conductividad y alta permitividad
 - => campo fuente muy alterado
- Corriente de desplazamiento entrando en el cuerpo
- Campo inducido \ll campo fuente
- Fuentes:
 - Líneas de transmisión de alto voltaje (10kV/m)
 - Tormentas eléctricas 3kV/m
 - Contacto con un conductor con carga eléctrica



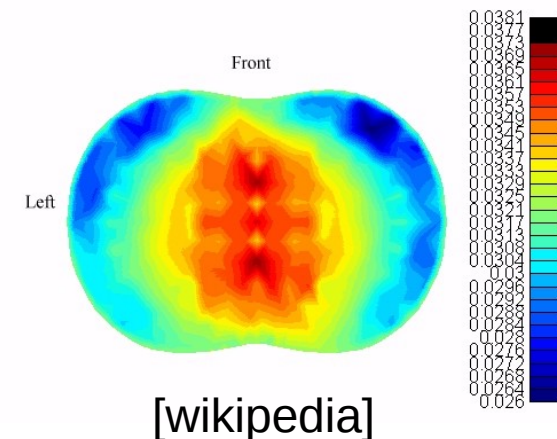
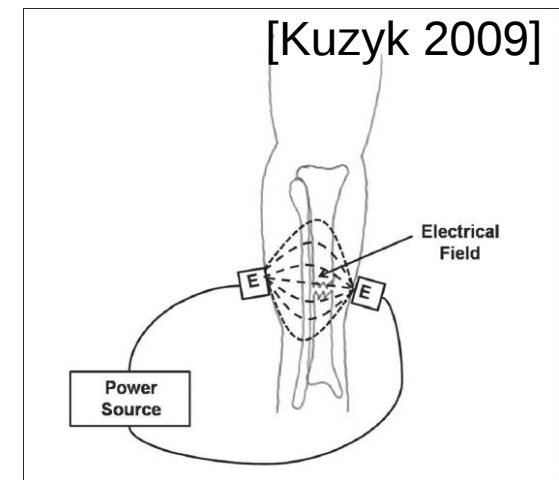
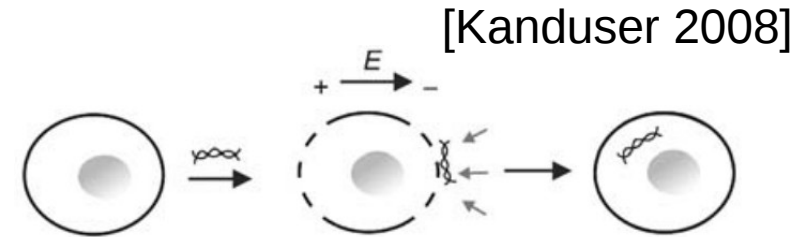
Evaluación de error por formulación

- Calculo de los campos inducido entre 10Hz y 1GHz
 - Campos eléctricos y magnéticos: onda plana
 - Elementos finitos
 - Problema canónico con propiedades de tejidos humanos
 - Error con respecto a una solución analítica en función de la frecuencia
 - => limites des aplicación de cada formulación



Campos electromagnéticos (activos) baja frecuencia en aplicaciones bio-medicales

- Escala celular
 - **Dielectroforesis, electrorotación**
 - 100Hz-100MHz
 - Campo aplicado ~ 10 kV/m
 - **Electroporación (reversible)**
 - TMP~200-1000 mV
 - Campo aplicado ~100 kV/m
 - Impulsos cortos (1-1000us, frecuencia de repetición 1-10Hz)
- Reparación de tejidos óseos
 - **20-200kHz, campo inducido 0.1-10V/m**
- Desfibrilador: 5 kV, 50A, 1 ms
- Espectroscopia bioeléctrica
- Tomografía de impedancia eléctrica
- TMS (transcranial magnetic stimulation)
 - **pulsos de campo inducido hasta 100V/m en la corteza cerebral**
- Hipertermia magnética (radio frecuencia)
- Electro cirugía (radio frecuencia)



Recomendaciones de exposición humana

- ♦ World Health Organization



- ♦ **Campos de extremadamente baja frecuencia (2007)**

- ♦ http://www.who.int/peh-emf/publications/Completo_DEC_2007.pdf?ua=1

- ♦ IARC (International Agency for Research on Cancer): campos magnéticos de baja frecuencia “possibly carcinogenic” (power frequency, 0.3uT)

- ♦ <http://www.emfs.info/health/reviews/iarc/>

- ♦ ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)

- ♦ <http://www.icnirp.org/>

- ♦ **Static and low frequency magnetic field (03/2014)**

- ♦ http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPmvtgdl_2014.pdf

- ♦ **Laser radiation of wavelength between 180 nm and 1000 um (09/2013)**

- ♦ http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLaser180gdl_2013.pdf

- ♦ **Visible and infrared radiation (2013)**

- ♦ **Low frequency 1Hz-100kHz (12/2010)**

- ♦ <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdl.pdf>

- ♦ => recomendaciones nacionales

Filosofía de las recomendaciones del ICNIRP (ICNIRP 2002)

- ♦ Proteger contra efecto adverso en la salud
- ♦ Basado en el análisis de la literatura relevante
- ♦ Exposición / dosimetría:
 - ♦ **Grandeza biologicamente relevante**
 - ♦ **Restricción básica / nivel de referencia**
 - ♦ **Peor caso, límite**
- ♦ Exposición poblacional / ocupacional
- ♦ Factores de reducción:
 - ♦ **incertidumbres**
 - ♦ **Extrapolación de estudios en animales, diferencias fisiológicas entre personas...**

Filosofía de las recomendaciones del ICNIRP

Field and frequency range	Relevant mechanism of interaction	Adverse effect	Biologically effective physical quantity	Reference quantity for exposure
Static electric field	Surface electric charges	Annoyance of surface effects, shock	External electric field strength	Electric field strength
Static magnetic field	Induction of electric field in moving fluids and tissues	Effect on the cardiovascular and central nervous system	External external magnetic flux density	Magnetic flux density
Electric field <10MHz	Surface electric charges	Annoyance of surface effects, shock and burn	External electric field strength	Electric field strength
Electric (or Magnetic) field <10MHz	Induction of electric fields and currents	Stimulation of nerves and muscle cells, effect on nervous system functions	Tissue electric field strength or current density	Electric field strength (or magnetic flux density)
Electromagnetic fields 100kHz-300GHz	Induction of electric fields and currents; absorption of energy within the body	Excessive heating, electric shock and burn	Specific energy absorption rate	Electric field strength; magnetic field strength; power density
	>10GHz: surface absorption of energy	Excessive surface heating	Power density	Power density

Efectos en seres vivos

- ♦ **Campo magnético estático**

- ♦ **Campo eléctrico inducido**

- ♦ Cuerpo en movimiento :

- Para $B=4\text{T}$ y una velocidad de 0.5 m/s , 2V/m (=límite de estimulación del sistema nervoso periférico entre 10Hz y 1kHz)

- ♦ Circulación sanguínea:

- En el nodo sinusal, para $B=5\text{T}$, 100mA/m^2 (10% de campo endógeno máximo)

- ♦ **Fuerza magnética**

- ♦ Rotación de moléculas paramagnéticas

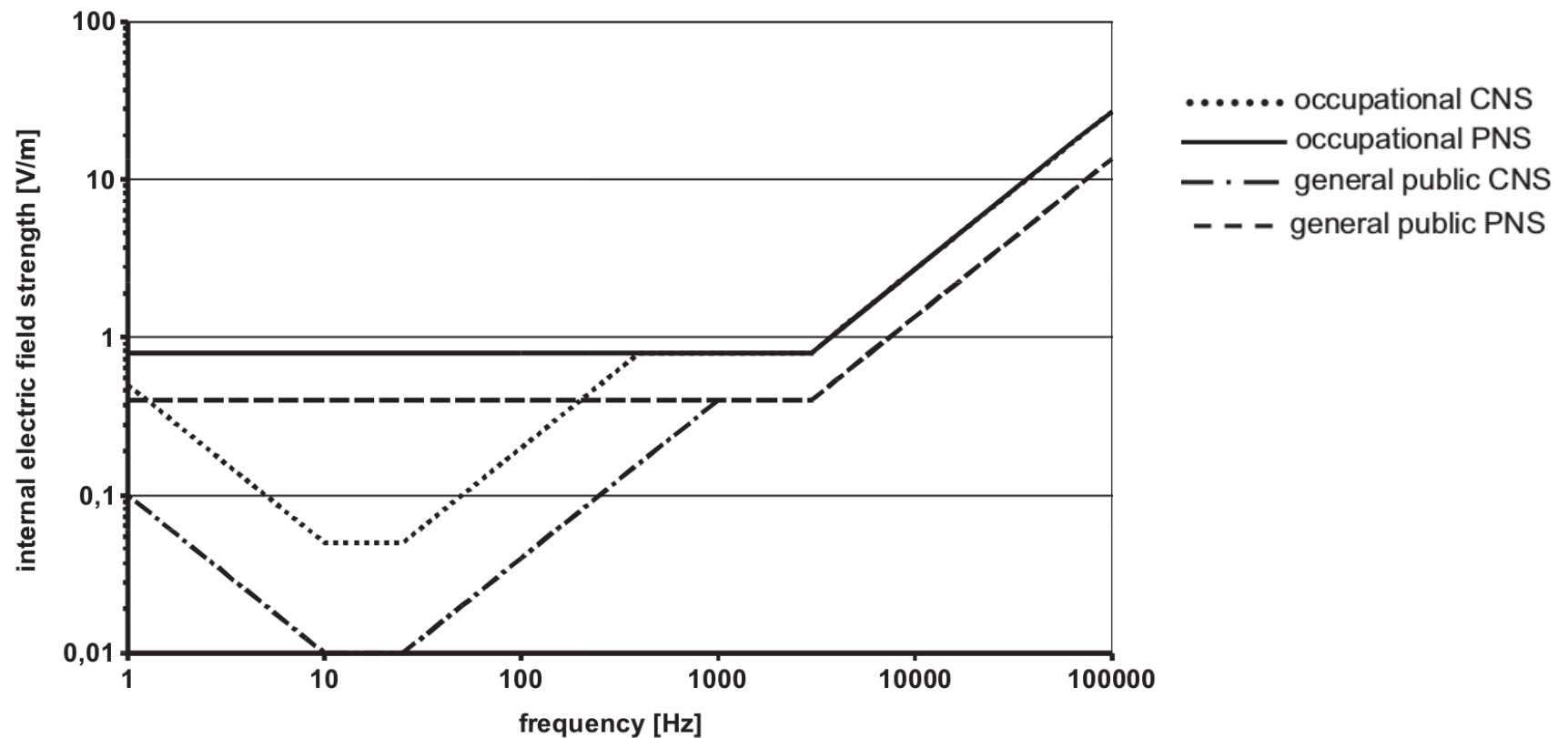
- ♦ Translación en gradiente de energía magnética: 8T ($400\text{T}^2/\text{m}$), reducción de flujo sanguíneo dérmico en ratas

Efectos en seres vivos

- ♦ Campos de baja frecuencia
 - ♦ **Percepción directa**
 - ♦ 5Hz, 2kV/m
 - ♦ Molestia 15kV/m
 - ♦ Chispa de descarga dolorosa en un campo de 5kV/m
 - ♦ **Magnetofosfenos: 5mT a 20Hz, 50-100 mV/m**
 - ♦ **Sistema nervoso central: posible perturbación a 100Hz con 100mV/m**
- ♦ 100kHz-300GHz:
 - ♦ **estimulación nervosa y muscular, calentamiento**
 - ♦ **30 min, SAR=1-4 W/kg => aumento de temperatura de 1°C**
 - ♦ **Frecuencias mas altas: calentamiento superficial**
 - ♦ **Conducción, convección y radiación térmica**

Recomendaciones

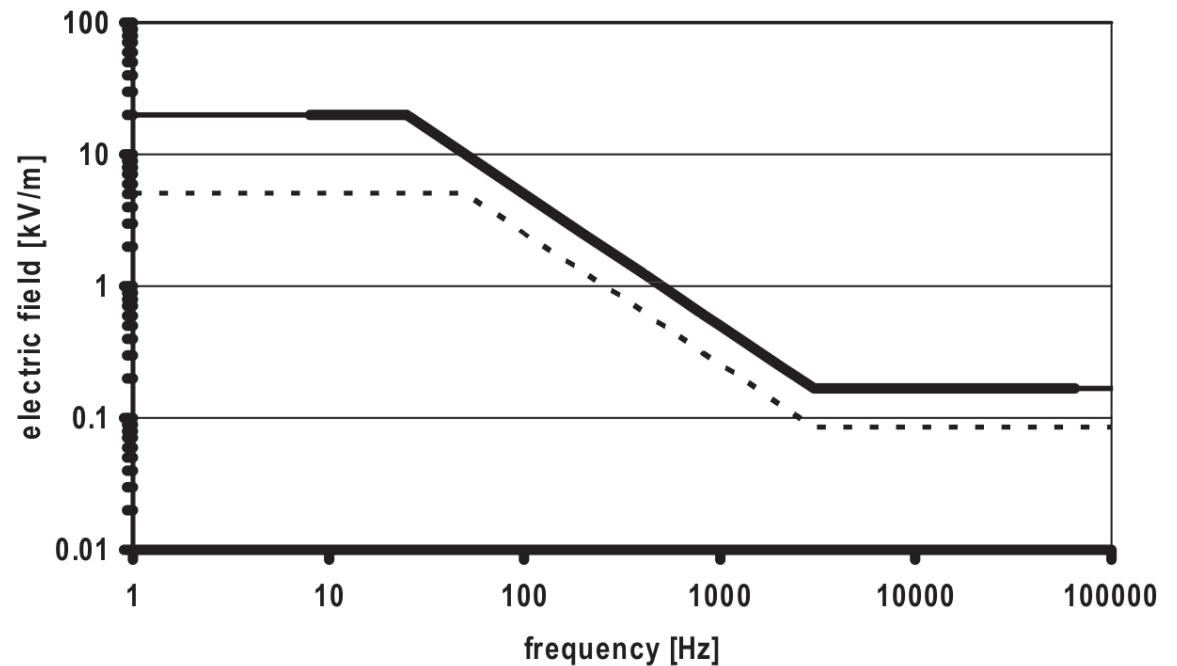
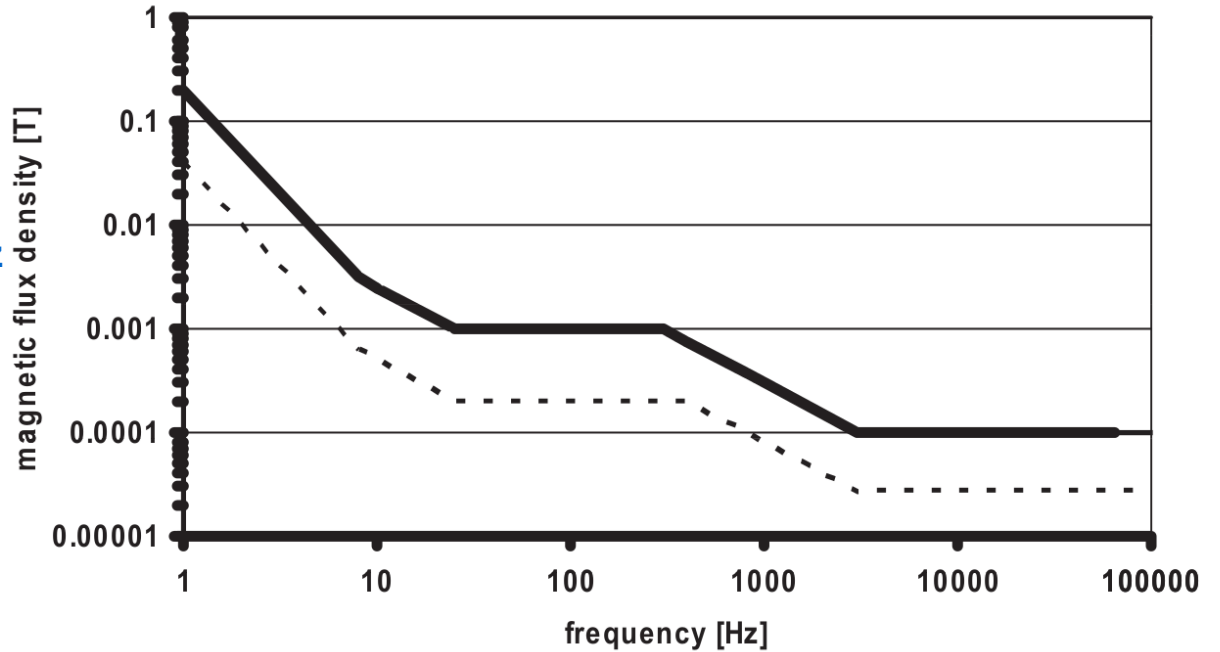
- ♦ ICNIRP 2010
 - ♦ Restricción básica
 - ♦ Campo eléctrico interno
 - ♦ Valor medio en volumen de $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$
 - ♦ CNS: Central Nerve Stimulation
 - ♦ PNS: Peripheral Nerve Stimulation



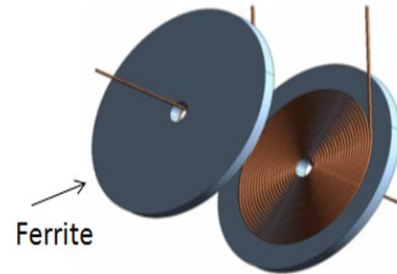
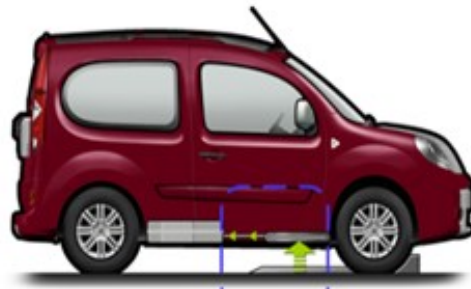
Recomendaciones

- ♦ ICNIRP 2010
 - ♦ Nivel de referencia
 - ♦ Campo fuente homogéneo, 50Hz
 - ♦ Skin: 20-60 mV/m por 1mT
12-33 mV/m por 1kV/m

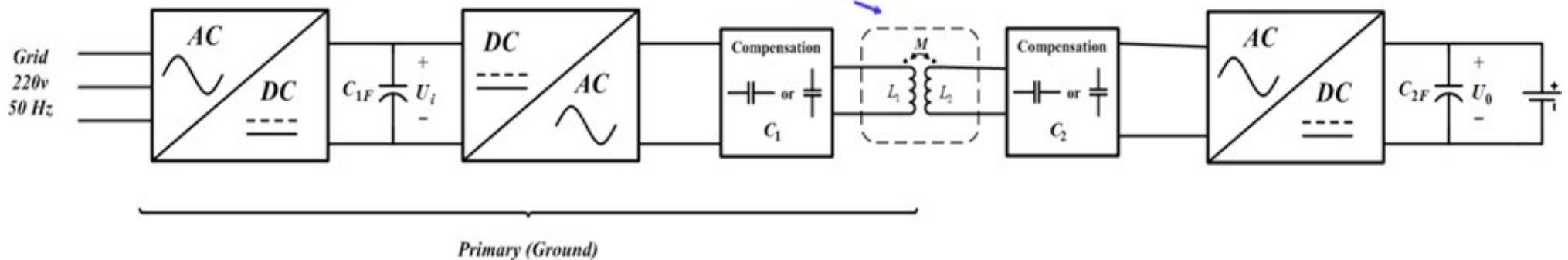
— occupational exposure
- - - general public exposure



Proyectos CINELI y WIC2IT



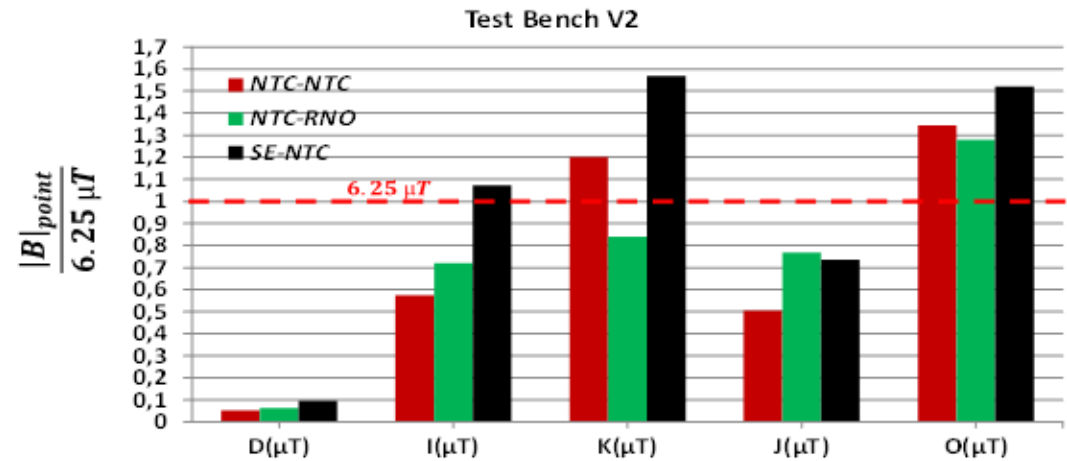
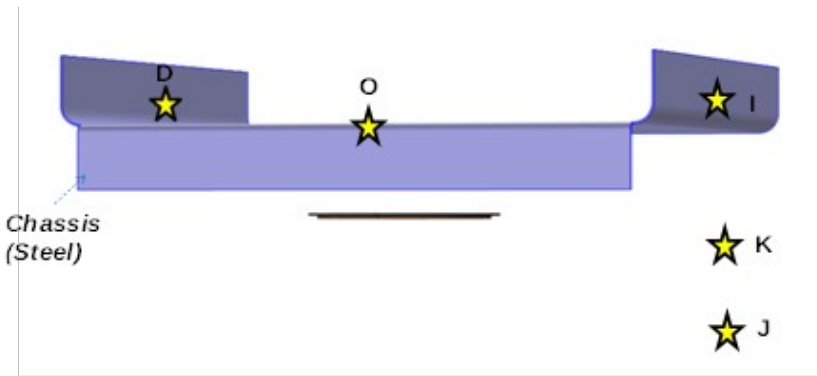
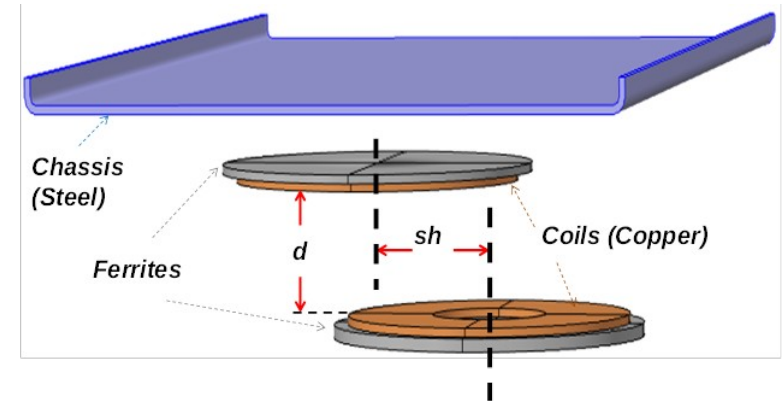
Secondary (On-board EV)



- Carga inalámbrica inductiva de vehículos eléctricos
- Interoperabilidad, exposición humana al campo magnético
- Frecuencia 30kHz, potencia 3kW, 300 - 400V (batería), $L \sim 300\mu\text{H}$, $k \sim 0.1 - 0.5$
- Diferentes tipos de acoplador (inductor) y configuraciones
- Acoplamiento inductivo: bobinas en espiral, ferritas

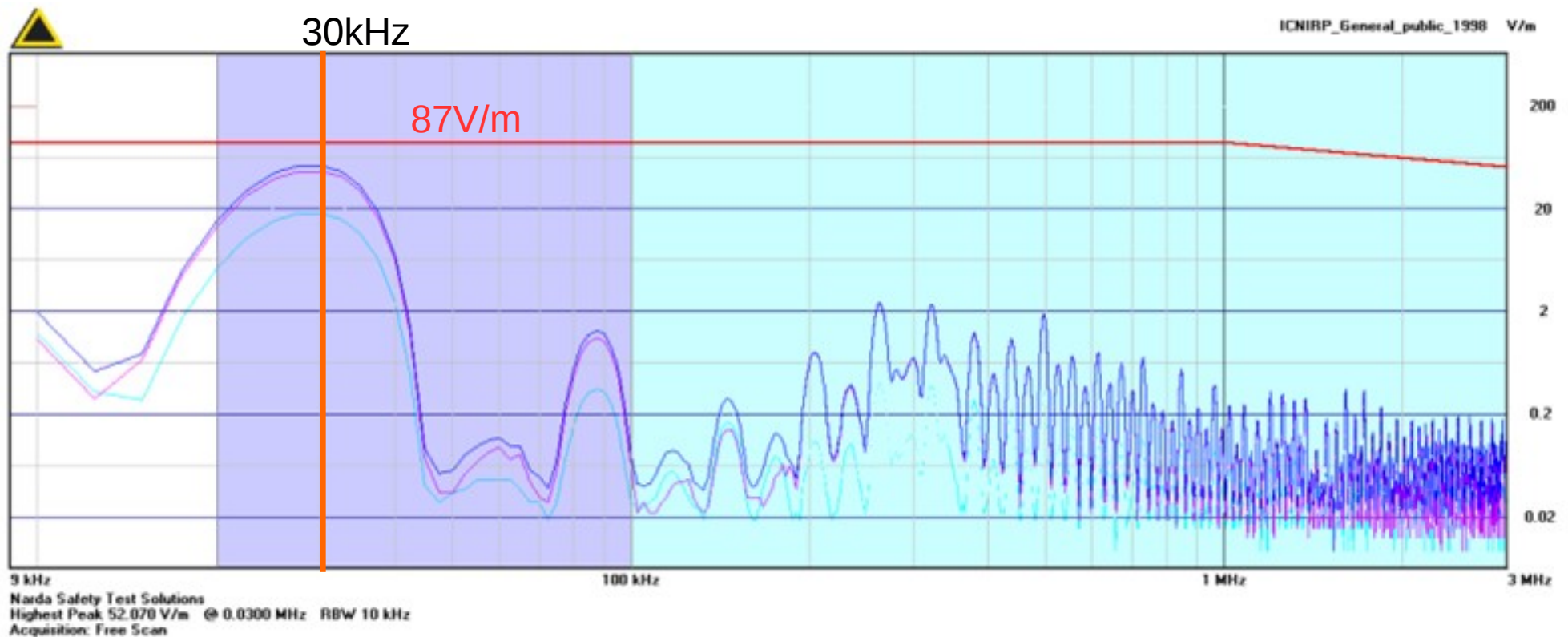
Proyectos CINELI y WIC2IT

- ◆ Modelo en elementos finitos
 - ◆ Chasis simplificado
 - ◆ Configuración geométrica variable
- ◆ Exposición al campo magnético
 - ◆ ICNIRP 1998: 6,25 μT



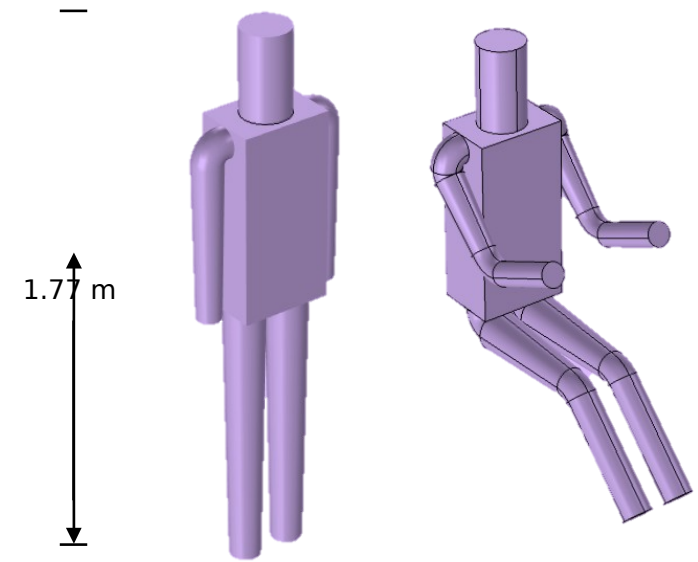
Proyectos CINELI y WIC2IT

- ◆ Exposición al campo eléctrico
 - ◆ 0.5 m atrás del vehículo
 - ◆ Recomendación ICNIRP 1998 : 87 V/m

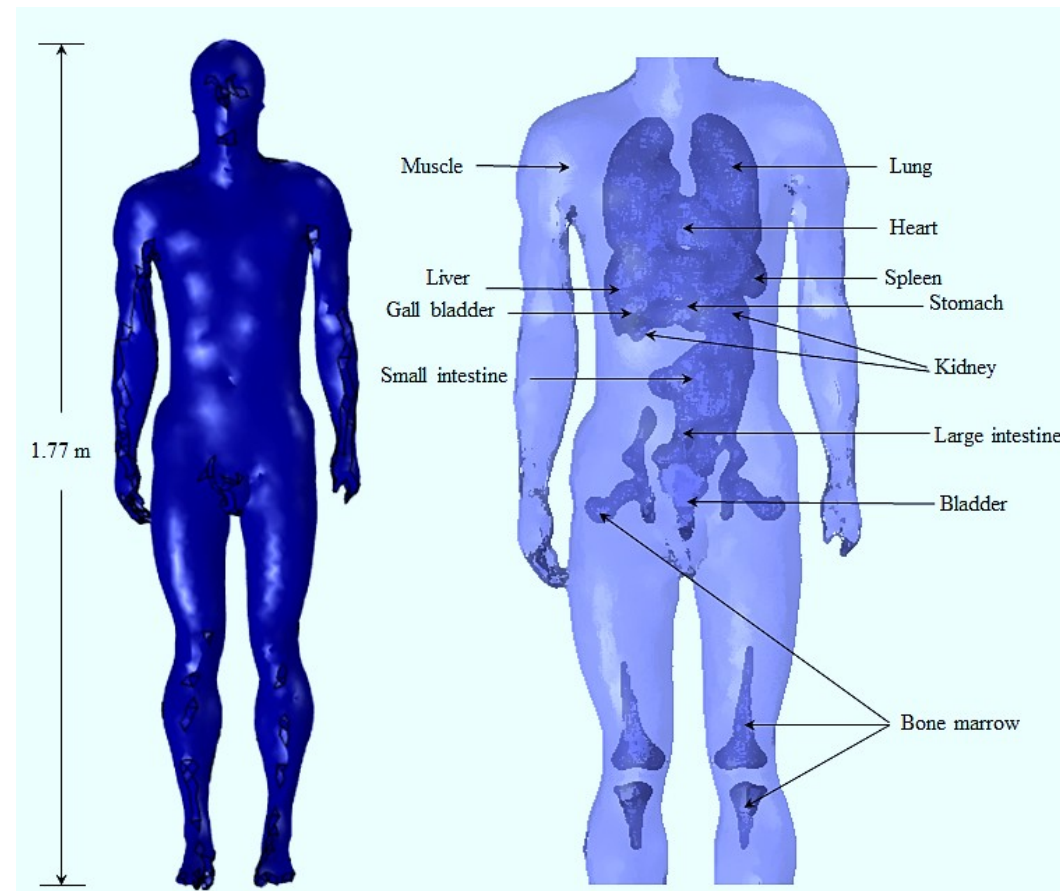


Proyectos CINELI y WIC2IT

- ◆ Modelos numérico
 - ◆ Simplificado: homogéneo y articulado
 - ◆ Realista: heterogéneo
 - ◆ Propiedades eléctricas:

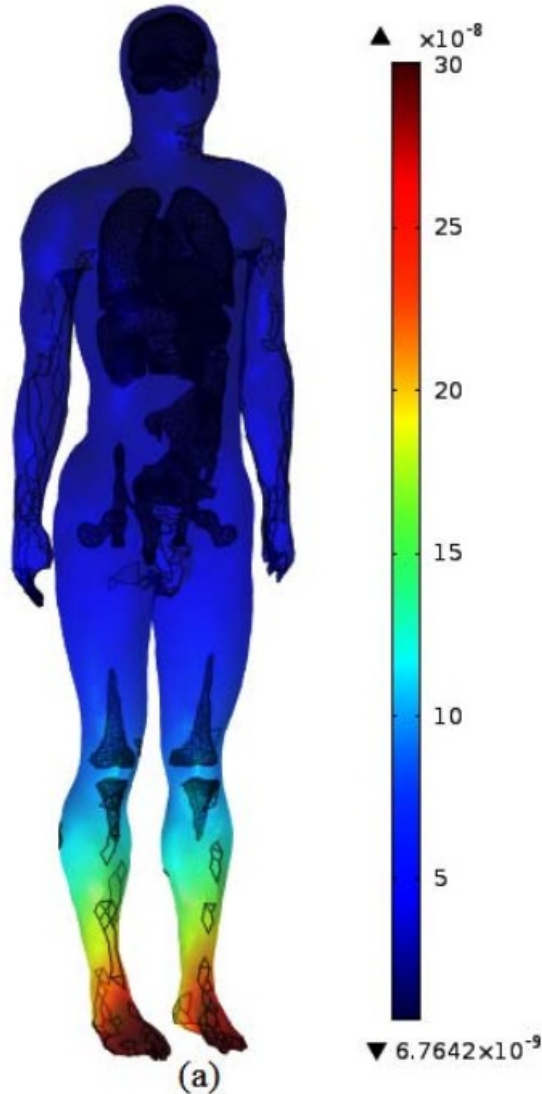
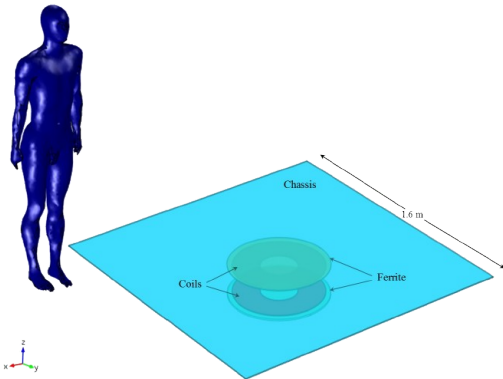


Organs of human model	Relative permittivity	Conductivity S/m
Bladder	2777	0.2156
Brain grey matter	8323	0.1236
Bone marrow	268.6	0.0030
Cerebellum	8618	0.1436
Gall bladder	122.6	0.9001
Heart	26166	0.1821
Kidney	16163	0.1521
Large intestine	4611	0.2444
Liver	14339	0.0654
Lung	12845	0.2556
Muscle	12468	0.3475
Small intestine	21778	0.5729
Spleen	7015	0.1154
Stomach	4421	0.5323

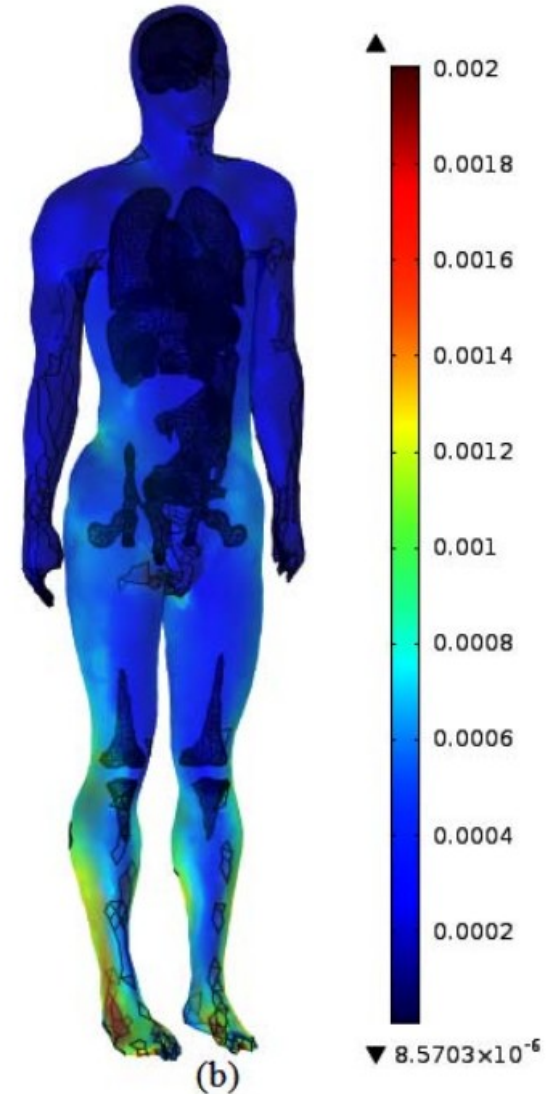


Proyectos CINELI y WIC2IT

- ◆ Configuración típica
 - ◆ (a) B(T)
 - ◆ (b) E(V/m)



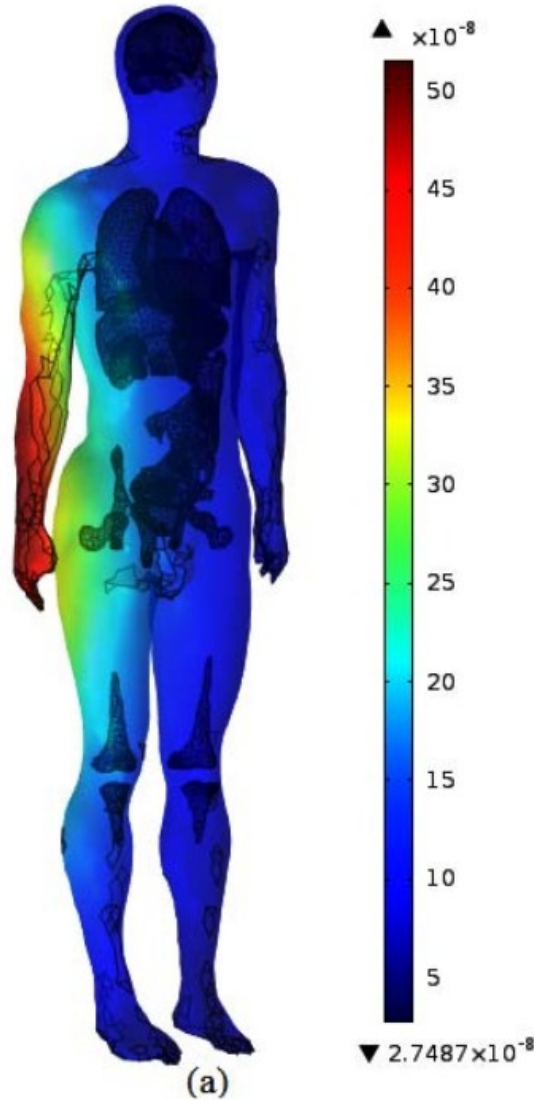
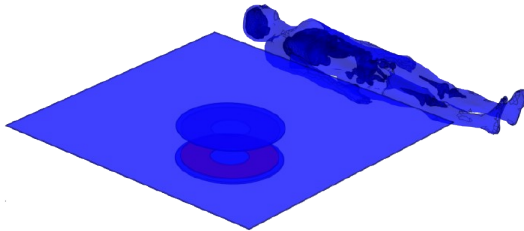
$B_{max} = 0.3 \mu\text{T}$



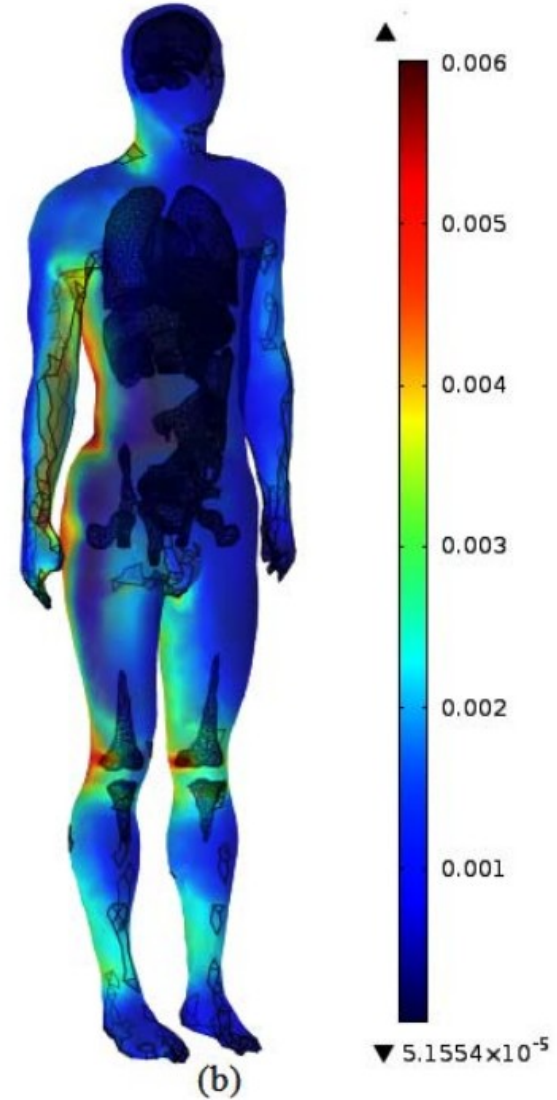
$E_{max} = 2 \text{ mV/m}$

Proyectos CINELI y WIC2IT

- ◆ Peor caso
 - ◆ (a) B(T)
 - ◆ (b) E(V/m)

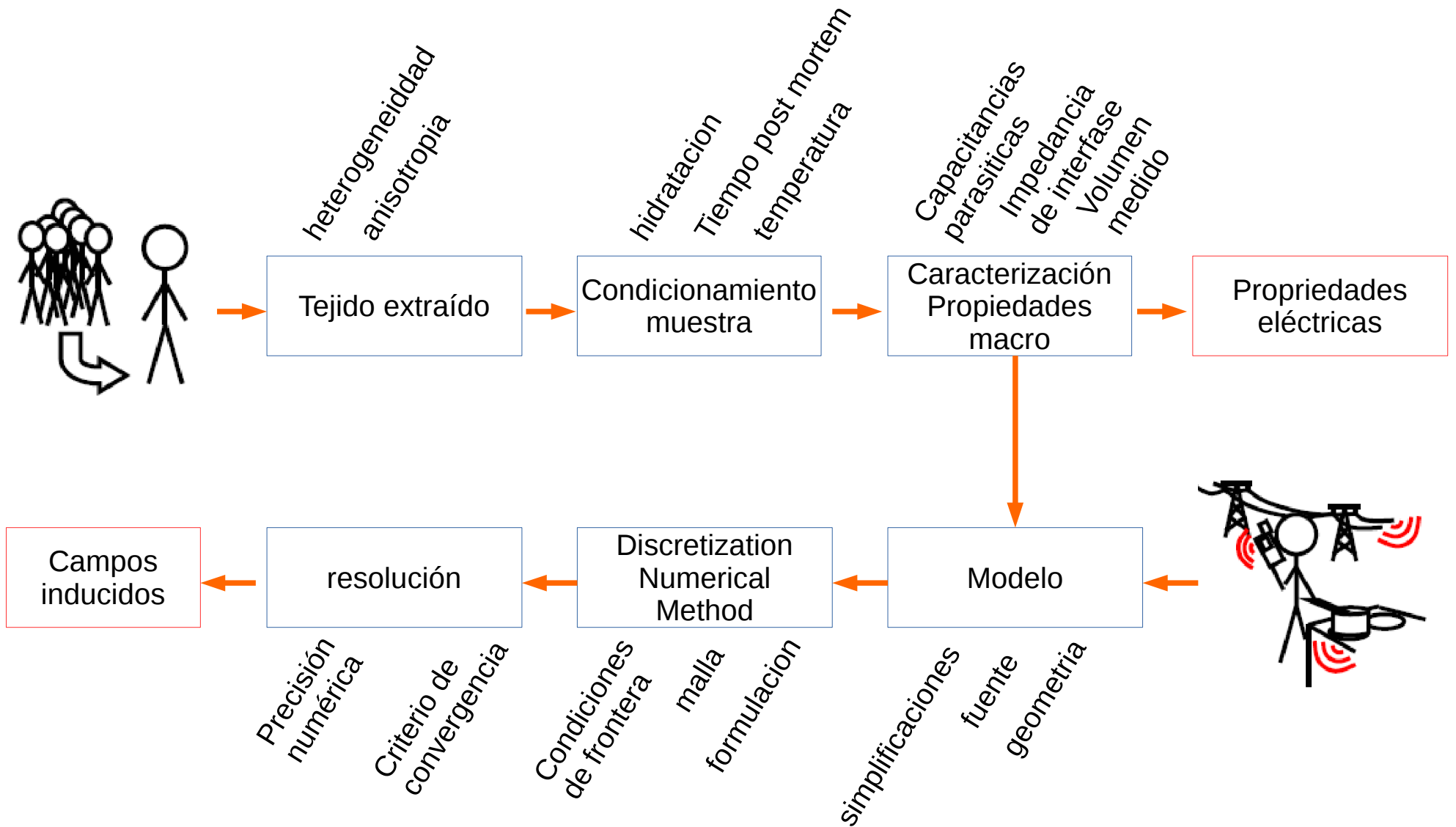


$B_{\max} = 0.5 \text{ uT}$



$E_{\max} = 6 \text{ mV/m}$

Errores en la evaluación numérica



Ministerio de Salud Pública

Artículo 5º.-


(Límites de Exposición a Campos Electromagnéticos)

Se adoptan como Límites Máximos Permitidos de exposición a Radiaciones No Ionizantes aquellos recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y contenidos en las Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Contra las Radiaciones No Ionizantes (ICNIRP) detalladas a continuación, sin perjuicio de las directivas y orientaciones complementarias de la Organización Mundial de la Salud y la Organización Internacional del Trabajo (OIT):-----

- a) para el rango comprendido entre 1 Hz (un herzio) y 100 kHz (cien kilohertzios) – se adoptan las “Directrices para limitar la exposición a los campos eléctricos y magnéticos variables con el tiempo (entre 1 Hz to 100 KHz) – ICNIRP 2010” que lucen en las Tablas 1, 4 y 5 que se anexan y forman parte integral del presente Decreto;-----
- b) para el rango comprendido entre 100 KHz y 300 GHz, se adoptan las – “*Directrices para limitar la exposición a los Campos Eléctricos, Magnéticos y Electromagnéticos variables con el*

tiempo (hasta 300 GHz) ICNIRP -1998” que lucen en las Tablas 2, 3, 6 y 7 que se anexan y forman parte integral del presente Decreto.-----

Montevideo, **28 FEB 2014**


JOSE MUJICA
Presidente de la República

Referencias

- [Bernard 2007] Bernard L., “Caractérisation électrique des milieux biologiques et calcul des phénomènes induits dans le corps humain par des champs électromagnétiques de fréquence inférieure au GHz”, <http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/848D.PDF> or <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00179791/fr/>
- [Ding 2014] Ding et al., “Evaluation of Electromagnetic Fields in Human Body Exposed to Wireless Inductive Charging System”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 50, NO. 2, FEBRUARY 2014.
- [Frenea-Robin 2009] Frenea-Robin et al., “Electromagnetic characterization of biological cells”, EHE'09 : International Conference on Electromagnetic Fields, Health and Environment
- [Gabriel 1996] S. Gabriel, RW Lau et C. Gabriel. « The dielectric properties of biological tissues : II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz ». Phys. Med. Biol, 41(11) :2251–2269, 1996.
- [Grimnes 2008] Grimnes and Martinsen, “Bioimpedance and bioelectricity”, second edition, Elsevier, 2008
- [Ibrahim 2014] Ibrahim Mohammad, “Wireless Inductive Charging for Electrical Vehicles: Electromagnetic Modelling and Interoperability Analysis”, PhD, Université Paris Sud, 2014
- [Jaspard 2003] Jaspard et al., “Dielectric properties of blood: an investigation of haematocrit dependence”, 2003 Physiol. Meas. 24 137
- [Kainz 2003] W. Kainz, D.D. Chan, J.P. Casamento et H.I. Bassen. « Calculation of induced current densities and specific absorption rates (SAR) for pregnant women exposed to hand-held metal detectors ». Physics in Medicine and Biology, 48(15) :2551–2560, 2003.
- [Kanduser 2008] Kanduser M, Miklavcic D (2008) Electroporation in biological cell and tissue: an overview. In: Vorobiev E, Lebovka NI (eds) Electrotechnologies for extraction from food plants and bio-material. Springer, New York, pp 1–37
- **[Kuzyk 2009]** Paul RT Kuzyk and Emil H Schemitsch, “The science of electrical stimulation therapy for fracture healing”, Indian J Orthop. 2009 Apr-Jun; 43(2): 127–131.
- [Martinsen 2002] Martinsen, Grimnes and Schwan, “Interface phenomena and dielectric properties of biological tissue”, Encyclopedia of Surface and Colloid Science, 2002
- [Pethig 1987] Pethig, “The passive electrical properties of biological systems: their significance in physiology, biophysics and biotechnology”, Phys. Med. Biol., 1987
- [Peyman 2001] Peyman et al., “Changes in the dielectric properties of rat tissue as a function of age at microwave frequencies”, Phys. Med. Biol. 46 (2001) 1617–1629
- [Scorretti 2004] Scorretti et al., « Computation of the induced current density into the human body due to relative LF magnetic field generated by realistic devices », IEEE Transactions on Magnetics, 40(2) :643–646, 2004.
- [Stuchly 1987] Stuchly et al., “RF Energy Deposition in a Heterogeneous Model of Man: Far-Field Exposures”, IEEE Trans. On Biomedical Engineering, 1987
- [Vander Vorst 2006] ANDRÉ VANDER VORST, ARYE ROSEN, YOUJI KOTSUKA, “RF/Microwave Interaction with Biological Tissues”, John Wiley & Sons, 2006
- [Yamazaki 2001] K. Yamazaki, T. Kawamoto, H. Fujinami et T. Shigemitsu. « Investigation of ELF magnetically induced current inside the human body : Development of estimation tools and effect of organ conductivity ». Electrical Engineering in Japan, 134(2) :1–10, 2001.