

## Objetivo

Evaluar la viabilidad técnico–económica y ambiental de sistemas de transmisión de energía inalámbrica basados en resonancia electromagnética terrestre (RET), desde el nivel de concepto hasta un piloto de campo de baja potencia.

## Alcance

- Frecuencias objetivo: **ELF–VLF (3 Hz–30 kHz)** para acoplo con modos terrestres de gran penetración; **LF–MF (30 kHz–3 MHz)** para pruebas de laboratorio y prototipos compactos.
- Potencias de ensayo: **1–500 W** en laboratorio; hasta **1 kW** en piloto controlado.
- Distancias: **10–100 m** en laboratorio, **0.5–5 km** en exterior controlado.
- Entornos: interior apantallado (cámara semianecoica) y exterior rural con baja interferencia.

## Hipótesis de trabajo

1. La RET permite **transferencia de energía útil** entre nodos sintonizados (emisor–repetidor–receptor) mediante **acoplo inductivo/capacitivo extendido** y/o excitación de **modos guiados** en el subsuelo y la ionosfera.
2. El rendimiento depende de **Q** de los resonadores, **coeficiente de acoplo k**, **conductividad del terreno  $\sigma$** , **permitividad efectiva  $\epsilon_r$**  y **pérdidas radiativas**.
3. Es factible definir **ventanas espectrales** con **SNR** suficiente y exposición EMF compatible con normativa.

## Marco teórico resumido

### Modelo de resonadores acoplados

Dos resonadores con frecuencias  $f_1 \approx f_2 = f_0$ , factores de calidad  $Q_1, Q_2$  y acoplo  $k$ . La eficiencia de transferencia en el pico de resonancia (carga ajustada) puede aproximarse por:

$$\eta \approx \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + Q_1 Q_2) + k^2 Q_1 Q_2} \approx \frac{k^2 Q_1 Q_2}{1 + \sqrt{\frac{Q_1}{Q_2}} + k^2 Q_1 Q_2}$$

con  $Q_L$  el Q efectivo de carga en el receptor. Para redes de múltiples nodos, usar **matrices de admitancia** y **circuitos equivalentes de Foster**.

## Atenuación en el medio terrestre

- **Profundidad de piel:**  $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$ . A frecuencias ELF–VLF,  $\delta$  puede ser de metros a kilómetros según  $\sigma$ .
- **Constante de propagación:**  $\gamma = \alpha + j\beta$ , con  $\alpha$  dominando pérdidas en suelos resistivos.
- **Modos de canal:** guía tierra–ionosfera (VLF), modos cuasi–TEM en estratos húmedos, acoplo por líneas de campo quasi–estáticas.

## Dimensionamiento preliminar

- **Q del resonador:**  $Q = \omega L / R$  para lazo inductivo;  $Q = 1 / \omega RC$  para tanque capacitivo. Objetivo:  **$Q > 200$**  en laboratorio,  **$Q > 50$**  en exterior.
- **k efectivo** decrece con separación y desajuste polar; se maximiza con **alineación de dipolos y bobinas toroides/solenoides** de gran área efectiva.

## Metodología

### 1) Modelado de transferencia entre nodos resonantes

#### 1.1. Circuitos equivalentes

- Emisor/receptor: tanques **RLC** ajustables (solenoides + capacitor variable + red de adaptación  $L/\pi/T$ ).
- Terreno/ionosfera: bloque **R–C distribuido** con  $\sigma(f), \epsilon_r(f)$  dependientes de humedad y salinidad.

#### 1.2. Simulación numérica

- **AC/Frecuencia:** barridos de **10 Hz–3 MHz**; extracción de  **$|S_{21}|, |S_{11}|, f_0, BW, Q$** .
- **Dominio temporal:** pulsos chirp para estimar **respuesta impulsional** del canal.
- **Barridos paramétricos:** geometría de bobinas (diámetro, espiras), altura sobre suelo, configuraciones **monopolo/dipolo**, redundancia de nodos.

#### 1.3. Métricas de desempeño

- **Eficiencia end-to-end  $\eta$**  y **potencia recibida  $P_r$**  a distancia **d**.
- **Densidad de potencia radiada** a 3–10 m.
- **Robustez** a desintonía  $\pm 1\text{--}5\%$ , **EMI** y cambios en  $\sigma, \epsilon_r$ .

### 2) Análisis de eficiencia, pérdidas y efectos secundarios

#### 2.1. Presupuestos de pérdidas

- Resistivas ( $R_{cu}, R_{contacto}$ ), dieléctricas ( $\tan \delta$ ), radiativas, y **pérdida en el medio** ( $\alpha \cdot d$ ).
- **Cálculo de sensibilidad** de  $\eta$  a  $Q, k, RLQ, k, R_L$ .

#### 2.2. Exposición y compatibilidad electromagnética

- Evaluación de **EMF** en puntos de acceso público.
- Ensayos **EMC**: emisiones conducidas y radiadas, **compatibilidad con VLF/LF** (navegación, radio).

### 2.3. Impacto ambiental

- Calentamiento local ( $\nabla \cdot (\sigma |E|^2)$ ).
- Interacción con **fauna sensible** (p. ej., migración de aves en VLF) y **sistemas biológicos**.

## 3) Prototipos experimentales a escala reducida

### 3.1. Banco de laboratorio

- **Resonador TX**: solenoide  $\varnothing$  300–600 mm, 50–200 espiras,  $L \approx 1\text{--}10$  mH; capacitor variable 100–2000 pF.
- **Resonador RX**: geometría espejo y **red de adaptación** a  $R_L$  (cargas resistivas 5–50  $\Omega$ ).
- **Repetidores pasivos**: bobinas sintonizadas intermedias.
- **Fuentes**: generador RF 1 mW–50 W con control de **AM/FM** y **PLL**.
- **Instrumentación**: VNA 10 Hz–3 GHz (para  $|S|$ ), analizador de espectros, osciloscopios sincronizados **GNSS/PPS**, sonda E/H, magnetómetros de flujo.
- **Apantallamiento**: jaula Faraday parcial para caracterizar pérdidas internas vs externas.

### 3.2. Piloto de campo

- **Geodesia**: mapeo de  $\sigma, \epsilon_r$  por **tomografía eléctrica** superficial (ERT) en trazado 0.5–5 km.
- **Electrodos de tierra**: estacas de baja impedancia, disposición **dipolo enterrado** y **lazo elevado**.
- **Telemetría**: enlaces UHF de datos, **seguimiento** continuo de potencia, fase,  $f_0$  y BW.
- **Sincronización**: GPSDO  $\pm 1$  ppb para coherencia entre nodos.

## Protocolos de ensayo y seguimiento

### P1. Barrido de resonancia local

- Sintonizar TX/RX en  $f_0$ . Medir  $|S_{11}|$ ,  $|S_{21}|$ ,  $Q$ . Criterio:  $|S_{21}| > -20$  dB a 10 m con 1 W TX.

### P2. Escalado de distancia

- 10, 30, 100 m: medir **Pr**,  $\eta$ , **BER** del canal (portadora modulada). Criterio:  $\eta > 1\%$  a 100 m con  $Q > 200$ .

### P3. Robustez a desajuste

- Variar  $f \pm 5\%$ , inclinación  $\pm 15^\circ$ , humedad del suelo (riego simulado). Criterio: degradación  $\Delta\eta < 3$  dB.

### P4. EMI/EMC

- Escaneo espectral 9 kHz–3 MHz. Criterio: emisiones fuera de banda < **límites** y sin interferencia significativa con servicios.

#### **P5. Piloto 0.5–5 km**

- Topología **TX–repetidores–RX** (2–4 saltos). Criterio:  **$P_r \geq 100 \text{ mW}$**  en RX con  $P_{TX} \leq 1 \text{ kW}$ , **SNR  $\geq 15 \text{ dB}$**  en banda útil.

## **Arquitecturas de red propuestas**

1. **Punto–punto resonante**: TX–RX sintonizados, enlace único.
2. **Cadena con repetidores pasivos**: bobinas sintonizadas elevan  $k$  efectivo.
3. **Malla de nodos activos**: cada nodo **re-sintoniza** y **re-fasea** (amplificación controlada) para compensar pérdidas.

**Control adaptativo**: lazo PLL distribuido para mantener  $f_{0f\_0}$ , **auto–sintonía** con varactores o bancos de capacitores; selección dinámica de banda con **criterio de mínima atenuación**.

## **Métricas clave y KPIs**

- **Eficiencia de extremo a extremo ( $\eta$ )**.
- **Potencia útil en carga ( $P_r$ ) y regulación** ante variaciones.
- **Q, BW y estabilidad térmica**.
- **SNR y BER** del canal modulado.
- **Densidad de potencia EMF** a 3/10 m.
- **Disponibilidad del enlace (%)** y **MTBF** de nodos activos.

## **Seguridad, ética y cumplimiento**

- Límites de exposición **EMF** en zonas accesibles; perímetros y señalización.
- Filtrado/Blindaje para minimizar **interferencia** con servicios LF/VLF.
- Evaluación de **riesgos ambientales** (fauna, suelos agrícolas, equipos médicos sensibles).
- Procedimientos de **apagado seguro** y bloqueos mecánicos.

## Resultados esperados

- **Mapa de ventanas espectrales** por tipo de terreno y estación (verano/invierno).
- **Curvas  $\eta(d)$**  para distintas arquitecturas.
- **Diseño de red piloto** con BoM, planos y procedimiento de despliegue.
- **Guía de operación:** sintonía, seguimiento, mantenimiento y criterios de expansión.

## Plan de trabajo (24 semanas)

### Fase 0 (Sem 1–2) — Preparación

- Requisitos, seguridad, permisos, selección de sitios.

### Fase 1 (Sem 3–8) — Modelado & diseño

- Modelos RLC y canal, simulaciones; selección de bandas y geometrías.

### Fase 2 (Sem 9–14) — Prototipos

- Construcción TX/RX, repetidores; validaciones P1–P3.

### Fase 3 (Sem 15–20) — Piloto controlado

- Despliegue 0.5–5 km, validaciones P4–P5, telemetría y seguimiento.

### Fase 4 (Sem 21–24) — Análisis & escalado

- Informe final, KPIs vs criterios, diseño de **red piloto** pre-operacional.

## Recursos e instrumentación

- VNA, analizador de espectros, osciloscopios  $\geq 200$  MHz, generadores RF, cargas programables.
- Sensores E/H calibrados, magnetómetros, termografía IR para pérdidas resistivas.
- GPSDO/disciplinadores, dataloggers y software de **seguimiento** (registro continuo de  $f_0$ , BW,  $|S|$ , Pr).

## Criterios de éxito (go/no-go)

- Laboratorio:  $\eta \geq 10\%$  a 10 m con 10 W TX;  $\eta \geq 1\%$  a 100 m.
- Campo ( $\leq 1$  kW TX): **Pr**  $\geq 100$  mW a 1 km con SNR  $\geq 15$  dB en la banda útil, sin incumplimientos EMF/EMC.

- Estabilidad de enlace  $\geq 95\%$  durante 72 h de operación continua.

## Anexos (resumen)

- A1. Cálculos de diseño de bobinas (L, R<sub>ac</sub>, efecto pelicular/proximidad).
- A2. Métodos de reducción de pérdidas: **litz**, cobre esmaltado de gran sección, capacitores NP0/COG, ferritas de baja pérdida.
- A3. Procedimientos de calibración de sondas E/H y trazabilidad.
- A4. Plantillas de registro para **seguimiento** operativo y bitácora de incidentes.

# Addendum: Protocolo experimental — WPT resonante sobre terreno (METFI)

## 1) Objetivos

1. Verificar la sintonía y estabilidad de dos resonadores (TX/RX) en  $f \approx 100\text{--}500$  kHz.
2. Medir  $k$ , coeficiente de acoplo en distintas distancias y condiciones de suelo.
3. Estimar eficiencia y potencia recibida.
4. Evaluar emisiones fuera de banda y comprobar límites EMC/locales de exposición antes y durante pruebas.
5. Generar datos para validar la hoja de cálculo de dimensionamiento.

## 2) Resumen del protocolo

Fase A — Bancada de laboratorio (verificación inicial): sintonía, mediciones de Q, VNA, V/I, prueba de carga.

Fase B — Campo (ondas superficiales, 0.5–20 m): despliegue de emisor y receptor, barridos de distancia/frecuencia, registro ambiental.

Fase C — Análisis y reporte.

## 3) Seguridad y cumplimiento

- Antes de encender: confirmar permisos locales y cumplir la normativa de exposición EM y EMC aplicable.
- Delimitar perímetro físico con cintas y señalética.
- Uso de EPI según riesgo (protección ocular, guantes aislantes si hay tensión).

- Tener un procedimiento de parada de emergencia (E-STOP) y un responsable de seguridad en el ensayo.
- Registrar dosimetría personal si potencia transmitida supera potencias bajas (según criterio de equipo de seguridad).
- Mantener bitácora de **seguimiento** y backups de datos.

## 4) Materiales y equipo (mínimo)

- Generador de señal / amplificador RF: rango 10 kHz–2 MHz, potencia hasta 200 W.
- Resonadores (TX y RX): bobinas Litz o solenoides/pancake con hueco central, montaje ajustable.
- Capacitores NP0/C0G de sintonía, arreglo para sintonía fina (bancos o trimmers).
- VNA (o analizador de impedancia) con adaptador 10 kHz–3 MHz.
- Osciloscopio  $\geq 100$  MHz, multímetro true-RMS, medidor de potencia RF (direccional).
- Sondas de campo E/H calibradas (para kHz–MHz) y sondas de corriente (Rogowski).
- Termómetro/IR para puntos calientes, cámara termográfica opcional.
- Conductivímetro/sonda de humedad de suelo, martillo y electrodos para planos de tierra.
- GNSS o NTP para sincronizar timestamps; laptop con la hoja de cálculo.
- Registrador de datos (logger) o laptop con conexión a instrumentos.
- Equipos de protección, E-STOP y extintor.
- Herramientas mecánicas, soportes aislantes, cinta métrica, nivel.

## 5) Preparación del sitio / montaje

### 5.1 Bancada (interior)

1. Instalar TX y RX sobre plataformas no conductoras (PVC o madera).
2. Comprobar conexión a tierra del banco (si aplica) y aislar planos metálicos indeseados.
3. Conectar VNA al puerto de TX (modo S11) para medir sintonía.
4. Instrumentación conectada y sincronizada con timestamps.

### 5.2 Campo (exterior)

1. Seleccionar zona plana y despejada, anotar coordenadas GNSS.
2. Marcar e instalar perímetro de seguridad (mín. 5 m o más según potencia).
3. Enterrar/colocar planos de retorno si procede (documentar profundidad, área y continuidad).
4. Medir y anotar humedad y conductividad del suelo en posiciones de TX y RX.
5. Montar soportes para bobinas y alinear sus ejes (documentar orientación).

## 6) Calibración (prioritaria)

1. Comprobar calibración VNA y sondas según instrucciones del fabricante.
2. Medir impedancia en abierto y cortocircuito del conjunto TX y RX.
3. Registrar respuesta de frecuencia S11 de cada resonador (0.1–2 MHz).
4. Ajustar C para obtener  $f_0$  deseada en ambos resonadores (dentro de  $\pm 0.1\%$  idealmente).
5. Medir Q: usar VNA para obtener ancho de banda a  $-3$  dB; . Registrar Q1 y Q2.
6. Comprobar pérdidas en líneas y conectores. Documentar todo.

## 7) Procedimiento experimental — Bancada (Fase A)

### 7.1 Objetivo A1: Sintonía y Q

1. Con TX desconectado del amplificador (alimentación baja), medir S11 TX y RX.
2. Ajustar capacitores hasta  $f_0$  coincidentes. Documentar  $f_{0\_TX}$ ,  $f_{0\_RX}$  y  $\Delta f$ .
3. Medir Q1 y Q2 en condiciones sin carga.

### 7.2 Objetivo A2: Medición de k a distancia mínima

1. Colocar RX a distancia de referencia (p. ej. 1 m).
2. Conectar el generador al TX con potencia baja (ej. 1–5 W).
3. Medir parámetros de circuito en TX y RX: voltajes, corrientes, y potencia incidente/reflejada.
4. Estimar k mediante métodos: (a) rechazo de frecuencia (splitting) o (b) medición de transferencia voltage/phase. Documentar procedimiento y fórmula usada.

### 7.3 Objetivo A3: Carga real y eficiencia

1. Conectar Rload al RX (incluir rectificador si corresponde).
2. Incrementar  $P_{tx}$  en pasos (1 W, 5 W, 10 W... hasta límite seguro).
3. Para cada paso, medir , (potencia entregada al Rload) y calcular .
4. Registrar temperatura de bobinas y posibles puntos calientes.

## 8) Procedimiento experimental — Campo (Fase B)

### 8.1 Preparativos

1. Revisar baseline de emisiones: medir ruido de fondo y espectro en el band test con el amplificador apagado (24–72 h baseline si es posible).
2. Anotar condiciones ambientales (temperatura, humedad, presión) y estado de suelo.

### 8.2 Barrido de distancia/frecuencia

1. Posicionar RX en distancias: 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 7.5, 10.0, 15.0 y 20.0 m (o selección práctica).



2. Para cada distancia:
  - a. Verificar sintonía; re-sintonizar si hay deriva.
  - b. Ejecutar barrido de frecuencia  $\pm 1-2\%$  alrededor de  $f_0$  para encontrar máximo de transferencia.
  - c. Medir y calcular .
  - d. Medir campos E/H a 0.5 m, 1 m y en perímetro del área de seguridad.
  - e. Registrar corriente en plano de retorno y cualquier corriente vagabunda.
  - f. Tomar fotografías térmicas y notas de comportamiento.
3. Repetir 3 repeticiones por distancia para estadística (media y desviación).

### 8.3 Barrido de carga y ángulo/alineación

1. Variar Rload (ej. 10  $\Omega$ , 25  $\Omega$ , 50  $\Omega$ , 100  $\Omega$ ) y medir impacto en .
2. Cambiar orientación relativa de bobinas (0°, 45°, 90°) y medir caída de acoplo.

### 8.4 Pruebas de interferencia / EMC

1. Con espectroanalizador, buscar emisiones fuera de banda y armónicos, medir potencia de emisiones espurias (dBc).
2. Encender/Apagar interferentes locales (si permitido) para observar susceptibilidad. Documentar.

## 9) Instrumentación y registros (formato de datos)

### 9.1 Plantilla mínima por ensayo (registro por fila)

- ID ensayo, Fecha/Hora (UTC), Responsable, Sitio (coordenadas), Fase (A/B).
- $f_{nom}$  (kHz),  $f_{meas\_TX}$  (kHz),  $f_{meas\_RX}$  (kHz),  $\Delta f$  (ppm).
- L1 ( $\mu H$ ), C1 (nF), R1 ( $\Omega$ ), L2 ( $\mu H$ ), C2 (nF), R2 ( $\Omega$ ).
- Q1, Q2,  $k_{est}$ , distancia (m), ángulo (°), Rload ( $\Omega$ ).
- $P_{tx}$  (W),  $P_{rx}$  (W),  $\eta$  (%),  $V_{tx}$ ,  $I_{tx}$ ,  $V_{rx}$ ,  $I_{rx}$ .
- Campo E (V/m) @ 1 m, Campo H (A/m) @ 1 m, Corrientes de retorno (A).
- $T_{bobina\_TX}$  (°C),  $T_{bobina\_RX}$  (°C).
- Observaciones (ruido, arcos, interferencias), fotos (ruta).

### 9.2 Frecuencia de muestreo y sincronización

- Registrar cada medición con timestamp GNSS/NTP; para barridos automáticos usar muestreo por segundo (o según instrumento).
- Mantener copias redundantes (local + nube segura).

## 10) Criterios de aceptación / métricas

- Sintonía:  $|f_{0\_TX} - f_{0\_RX}| \leq 0.1\%$  (mejor  $\leq 0.01\%$ ).
- Q medido acorde con diseño ( $\pm 20\%$  del valor esperado).

- Eficiencia en bancada:  $\eta \geq 50\%$  a distancias cortas (1–2 m) con  $P_{tx} \leq 200$  W para demostrar acoplo.
- Campo E/H en perímetro dentro de límites locales (obligatorio).
- En campo:  $P_{rx} \geq$  valor objetivo (ej.  $\geq 5$  W a 100–500 m para pruebas futuras) — para campaña inicial, demostrar caída coherente con modelo y reproducibilidad.
- Emisiones fuera de banda: armónicos/espurias  $< -50$  dBc (o según normativa).
- Registro de 3 replicados consistentes ( $CV \leq 15\%$ ) en ensayos principales.

## 11) Análisis y procesamiento de datos

1. Para cada distancia calcular:  $k(d)$  (según método elegido), y  $\eta$  (comparar con hoja de cálculo).
2. Graficar  $\eta$  vs distancia,  $P_{rx}$  vs distancia (log y lineal).
3. Analizar correlación entre  $\sigma$  (suelo) y pérdidas ( $P_{rx}$ ).
4. Identificar desviaciones y posibles causas (desintonía, drift térmico, acoplo al suelo).
5. Generar resumen estadístico (media, desviación estándar, intervalos de confianza).

## 12) Control de calidad y repeatability

- Repetir pruebas al menos 3 veces en distintos momentos del día y/o condiciones de humedad.
- Antes y después de cada campaña, comprobar sintonía y Q (baseline).
- Documentar cambios de configuración y mantener trazabilidad completa de componentes.

## 13) Troubleshooting común

- *Sintonía inestable*: revisar conexiones, pérdidas en trimmers, temperatura; usar sintonía automática/compensación térmica.
- *Baja Q*: verificar bobina (espiras sueltas), puntos de soldadura, corrosión o proximidad a objetos conductores.
- *Discrepancia  $P_{tx}/P_{rx}$  esperada*: verificar acoplo a tierra, corrientes vagabundas y alineación angular.
- *Emisiones espurias*: filtrar la salida del amplificador y verificar etapas de amplificación en clase adecuada.

## 14) Cronograma sugerido (laborable)

- Día 0: Preparación del sitio y verificación de equipo.
- Día 1–2: Calibración y fase A (bancada).
- Día 3–5: Fase B (campo): barrido de distancia y cargas.
- Día 6: Análisis rápido y verificación de cumplimiento EMC.
- Día 7: Repeticiones y cierre de campaña + informe preliminar.

## 15) Entregables al cierre

1. Archivo de datos CSV/Excel con todos los registros y fotos.
2. Gráficos:  $\eta$  vs distancia, Prx vs distancia, k vs distancia, Q vs temperatura.
3. Informe técnico (máx. 8–12 páginas) con metodología, resultados, discusión, riesgos y recomendaciones de diseño.
4. Plan de seguimiento: pruebas adicionales sugeridas (por ejemplo: retest en terreno con distinta conductividad).

## 16) Plantilla rápida de checklist pre-encendido

- Permisos y señalética en sitio.
- EPI disponible y E-STOP funcional.
- Instrumentos calibrados y sincronizados.
- Plan de registros y backups OK.
- Distancias y orientaciones marcadas.
- Baseline de ruido tomado.
- Responsable seguridad presente.