

Ingeniería Territorial IoT

De la física del sensor a la logística del dato. Un enfoque arquitectónico para el despliegue de infraestructura.

[PROYECTO: XDG CURSO 3]
[FASE: CAPA 0 Y 1]

El Paradigma Doméstico

En domótica conectamos dispositivos cercanos.

Corriente continua

Distancias cortas

Entorno protegido

Wi-Fi/Zigbee

El Paradigma Territorial

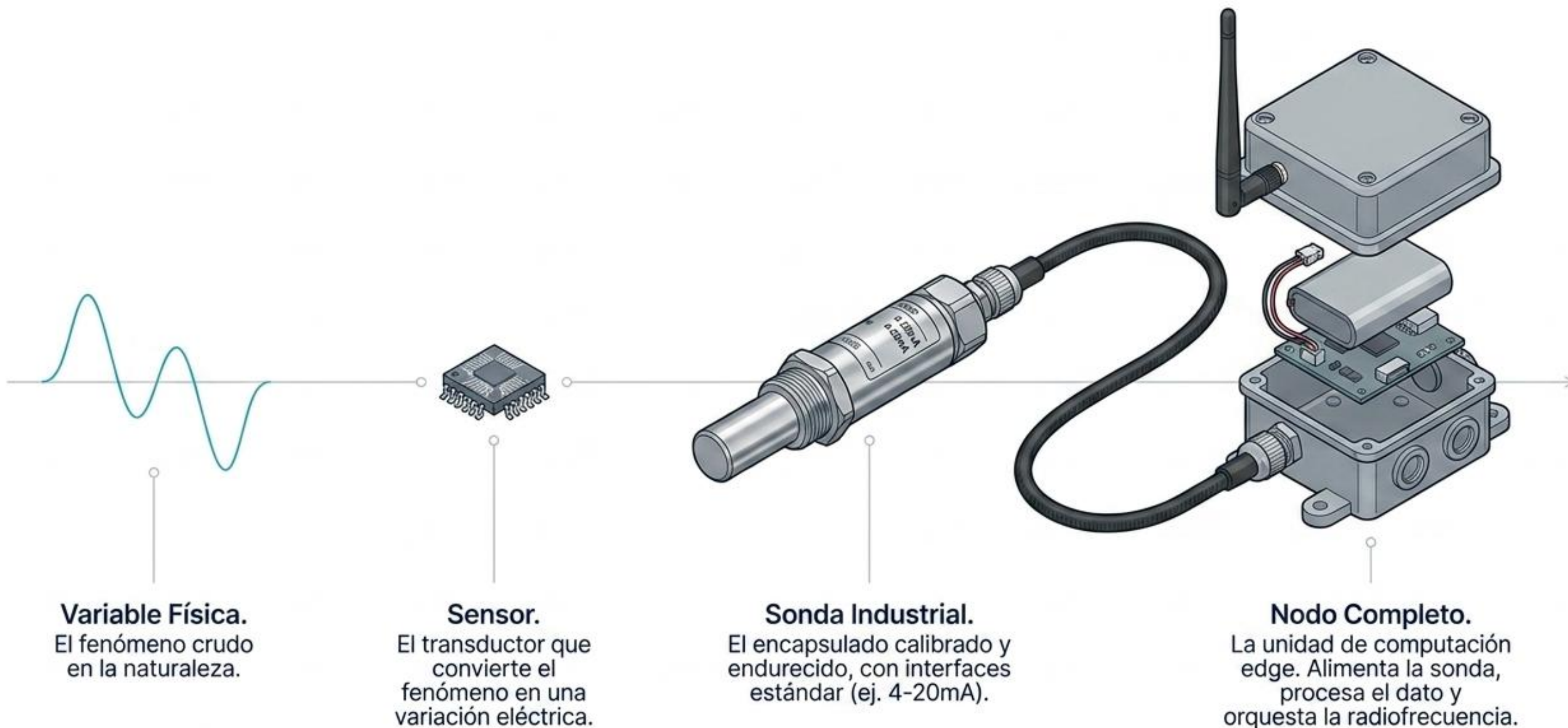
En territorio mantenemos sensores vivos, fiables y comunicados durante años.

Batería extrema

Kilómetros de distancia

Intemperie y vandalismo

LPWAN



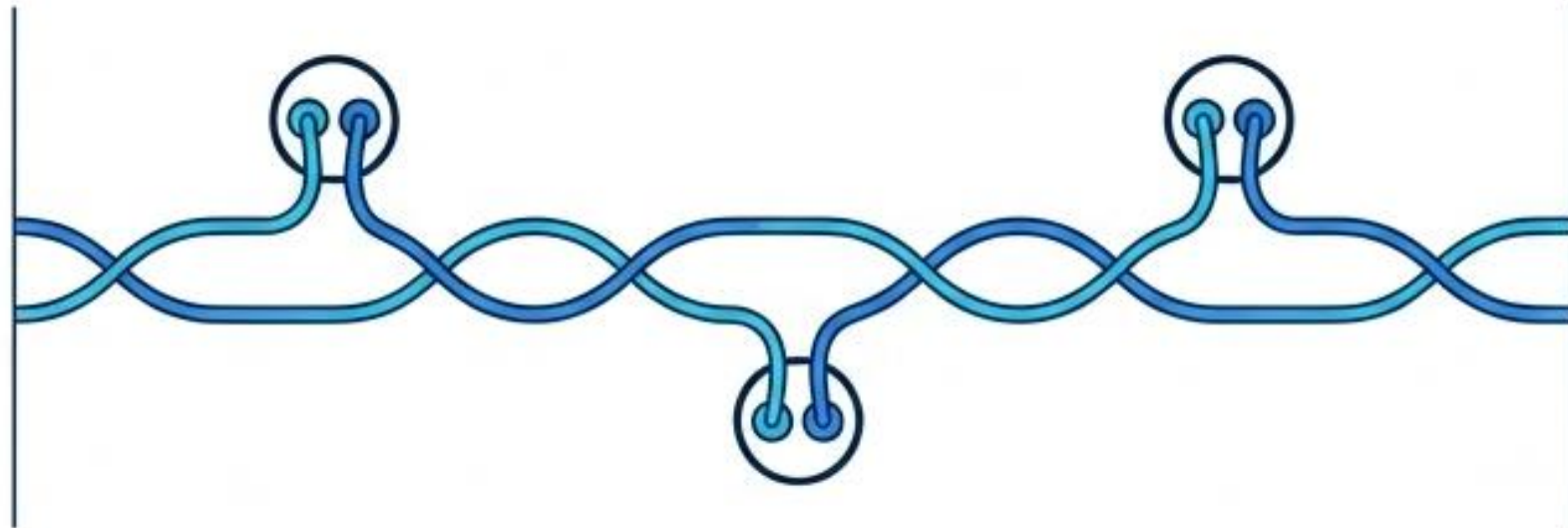
La temperatura no es LoRaWAN. LoRaWAN es cómo viaja el dato.

4-20 mA (Analógico)



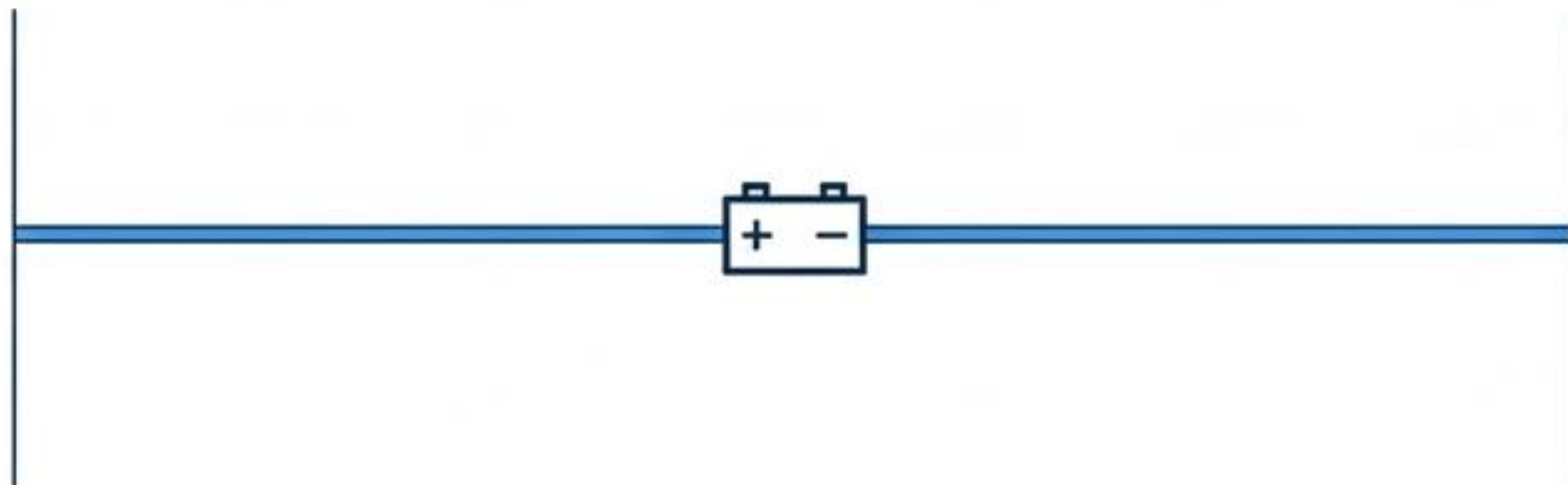
Inmunidad extrema al ruido en tendidos largos (hasta 1 km).
4 mA representa el "cero vivo" (detecta cables cortados).
20 mA es el fondo de escala.

Modbus RS-485 (Bus Digital)

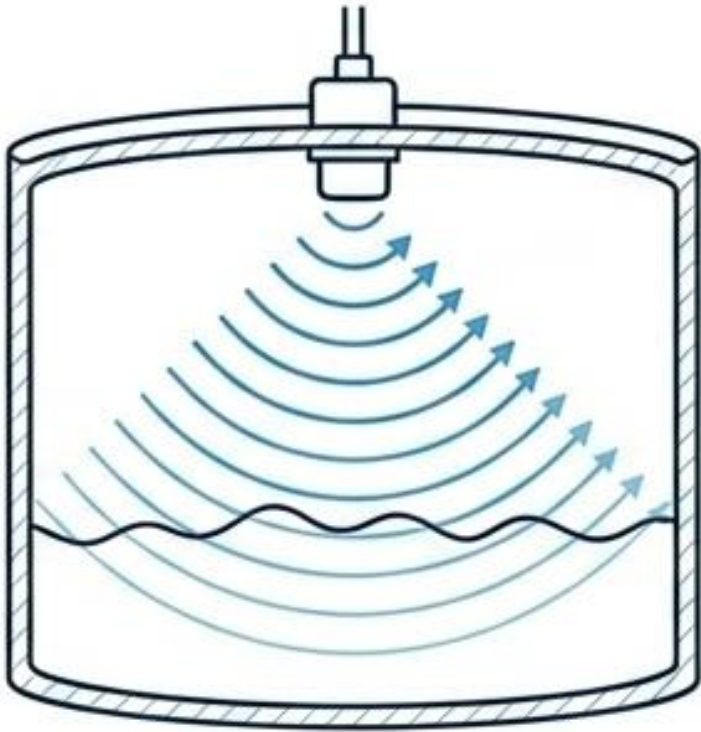


Transmisión diferencial sobre par trenzado.
Cancela el ruido de modo común.
Hasta 32 dispositivos y 1200 metros.

SDI-12 (Bus Ambiental)

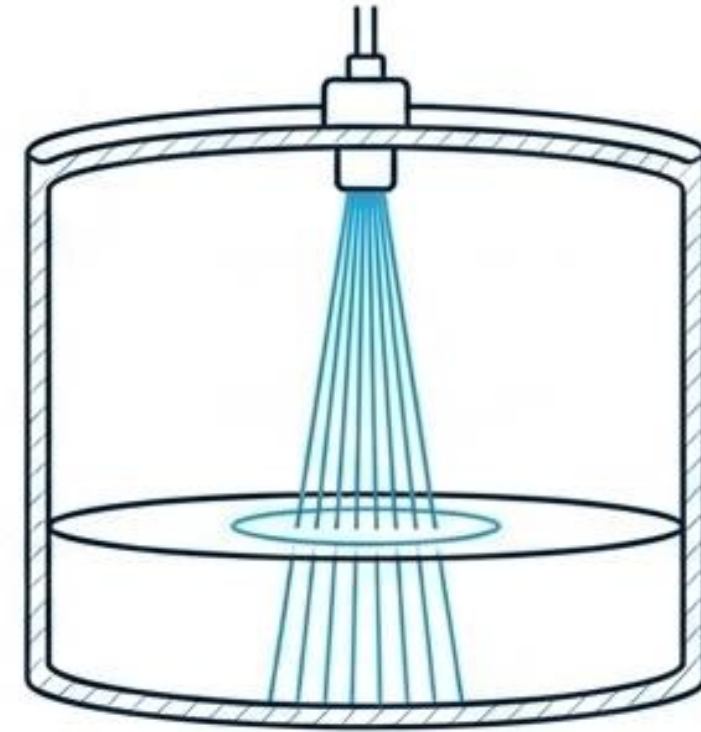


Bus estándar agrícola.
Un solo hilo de datos bidireccional.
Consumo de reposo ultrabajo (<math><15 \mu\text{A}</math>).



Sondas Ultrasonicas

- **Física:** Pulsos mecánicos (30-240 kHz). Mide el tiempo de vuelo del eco.
- **Vulnerabilidad arquitectónica:** La velocidad del sonido depende de la temperatura ($v \approx 331.3 \sqrt{(1 + T/273.15)}$). Errores severos con variaciones térmicas diurnas. Afectado por viento y espuma.



Radar FMCW 80 GHz

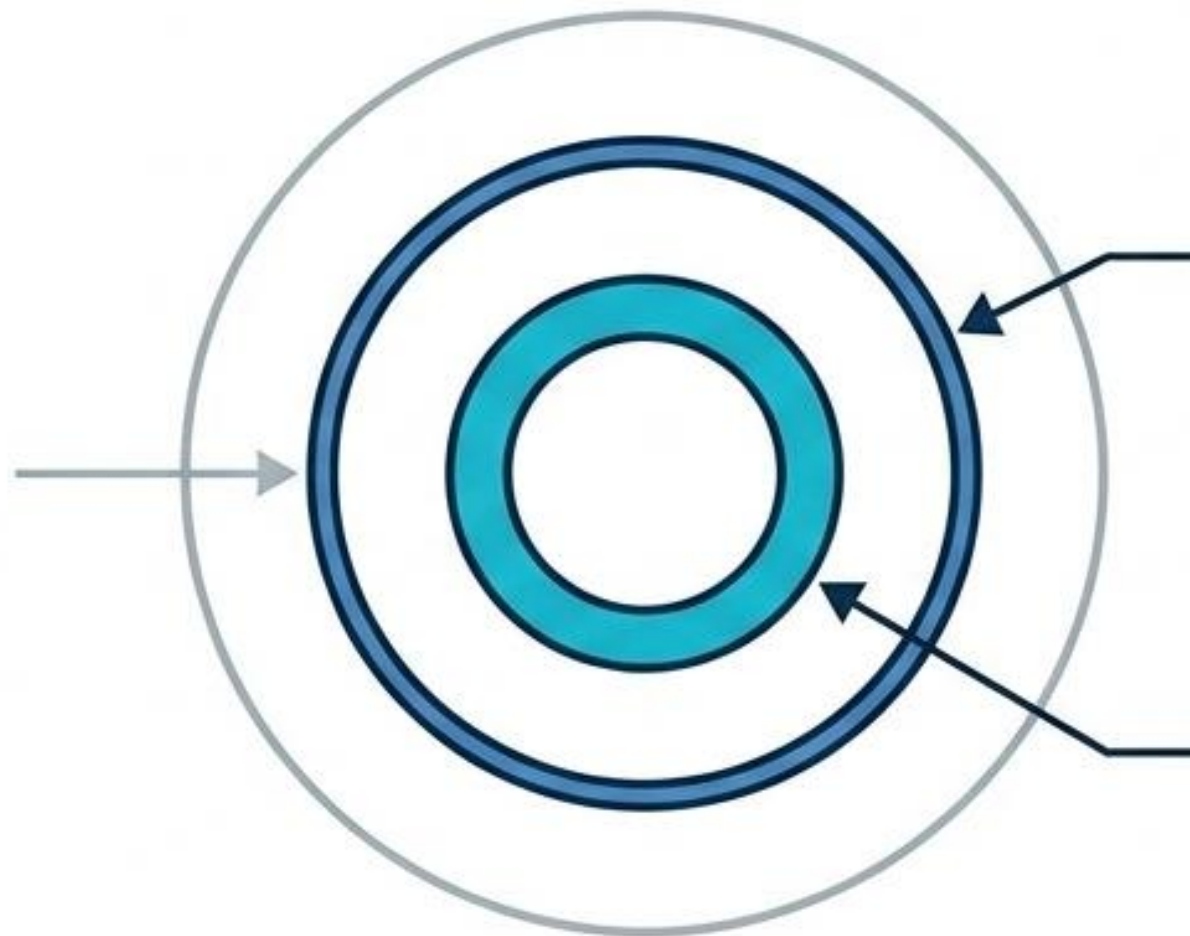
- **Física:** Ondas electromagnéticas a la velocidad de la luz ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s).
- **Ventaja arquitectónica:** Inmune a la temperatura del aire, viento o vapor. Ángulo de haz estrecho (3.6°). Penetración a través de plásticos/fibra de vidrio.

Supervivencia Ambiental

- **IP67:** Inmersión temporal (30 min / 1m).
- **IP68:** Inmersión continua (ej. 3m / 24h). Crítico para arquetas y alcantarillado.

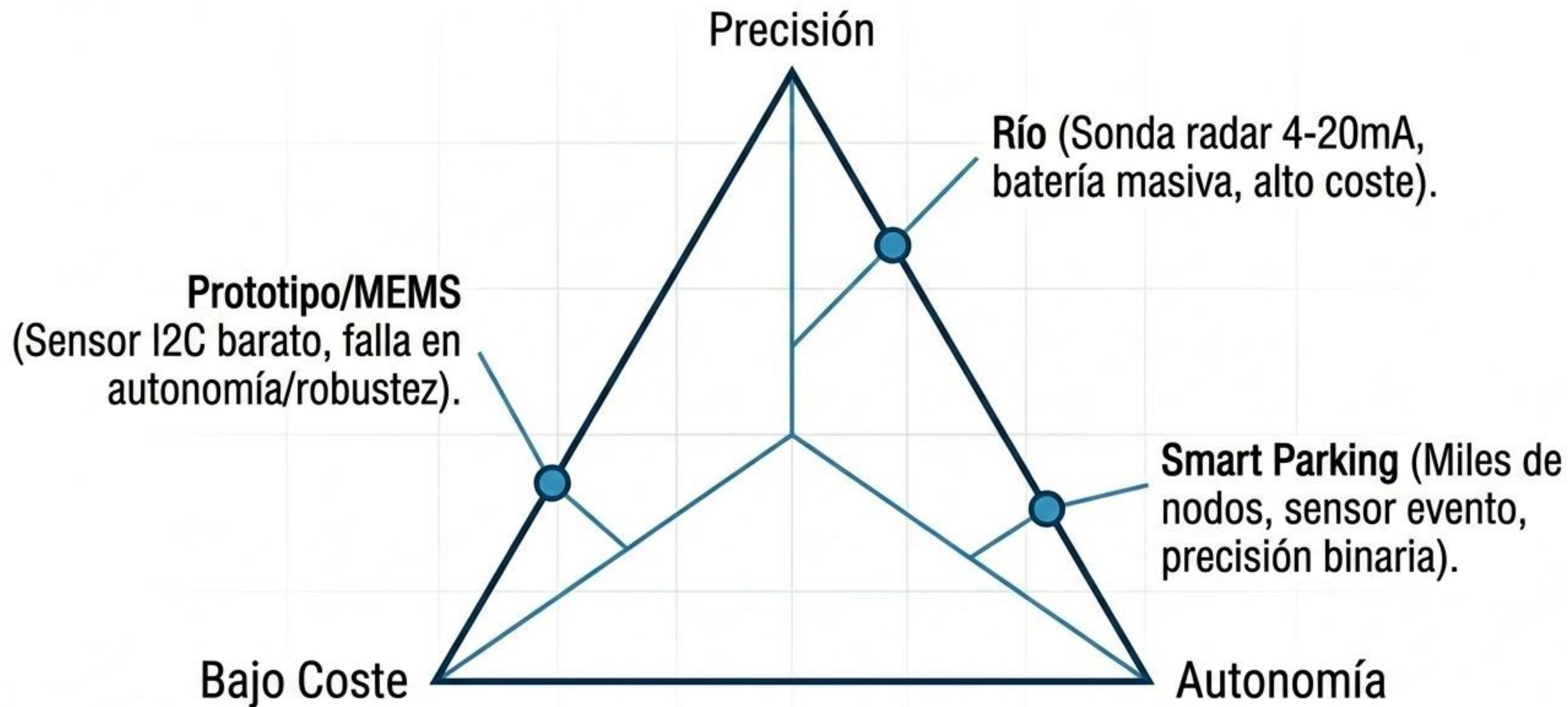
Directivas ATEX - Riesgo de Explosión

Zona 2 (<10h/año):
Riesgo improbable.
improbable. Dispositivos
no incendiarios (Ex nA).



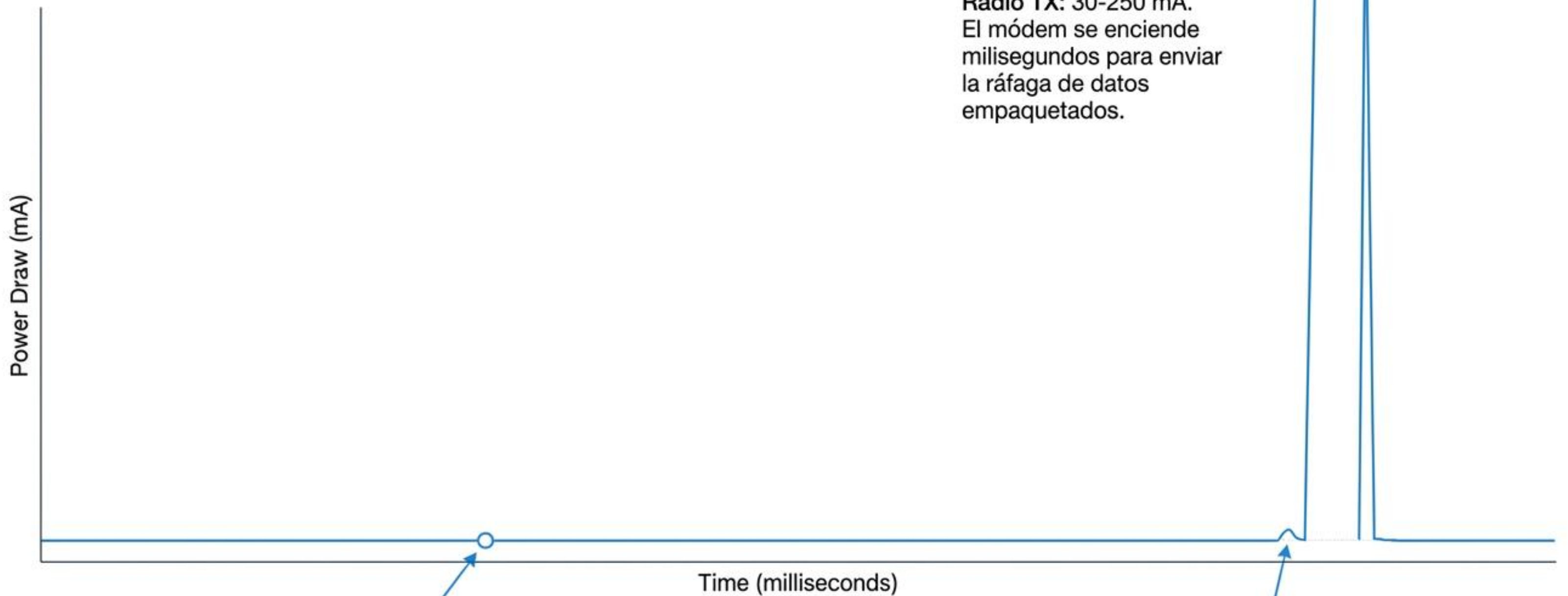
Zona 1 (10-1000h/año):
Riesgo probable. Encapsulado
antideflagrante (Ex d) o
seguridad aumentada.

Zona 0 (>1000h/año):
Peligro continuo. Seguridad
intrínseca extrema (Ex ia).
Tolerancia a doble fallo.



La optimización real consiste en minimizar el coste total de propiedad (mantenimiento y fallos), no en comprar el sensor unitario más barato.

Medir poco, dormir mucho, transmitir solo lo necesario.
La batería dicta el MTBF (Mean Time Between Failures).



Sleep Mode: $<1.5 \mu\text{A}$.
El microcontrolador (ej. STM32U5)
está en Stop Mode 2.

LPBAM: Low Power Background Autonomous Mode.
Adquisición DMA directa de sensores
sin despertar la CPU principal.

Radio TX: 30-250 mA.
El módem se enciende
milisegundos para enviar
la ráfaga de datos
empaquetados.



El salto radioeléctrico se realiza bajo estrictas restricciones de ancho de banda y balance de enlace (*link budget*). El protocolo elegido define la topología del territorio.

Wi-Fi



Contexto:

- Excelente ancho de banda, cámaras, infraestructura alimentada.



Falla en territorio:

- Consumo energético masivo, dependencia de routers locales, nubes propietarias.

Zigbee



Contexto:

- Red mesh de bajo consumo para automatización de edificios.



Falla en territorio:

- Depende de nodos intermedios repetidores (que requieren energía). Alcance limitado por salto.

Z-Wave



Contexto:

- Ecosistema cerrado, muy robusto para seguridad residencial sub-GHz.

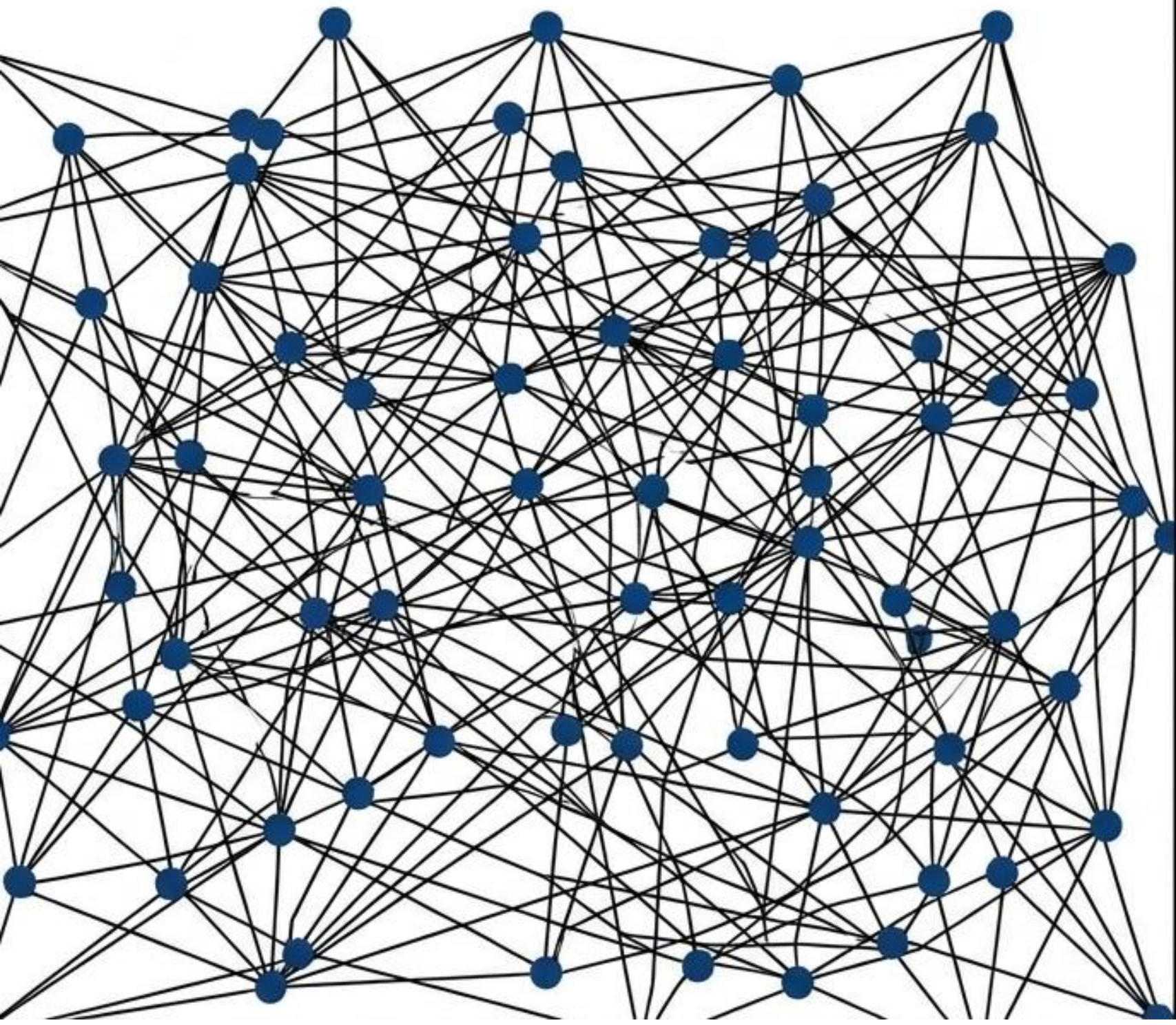


Falla en territorio:

- Enfoque puramente comercial/doméstico. No escala a cuencas hidrográficas o kilómetros de viñedos.

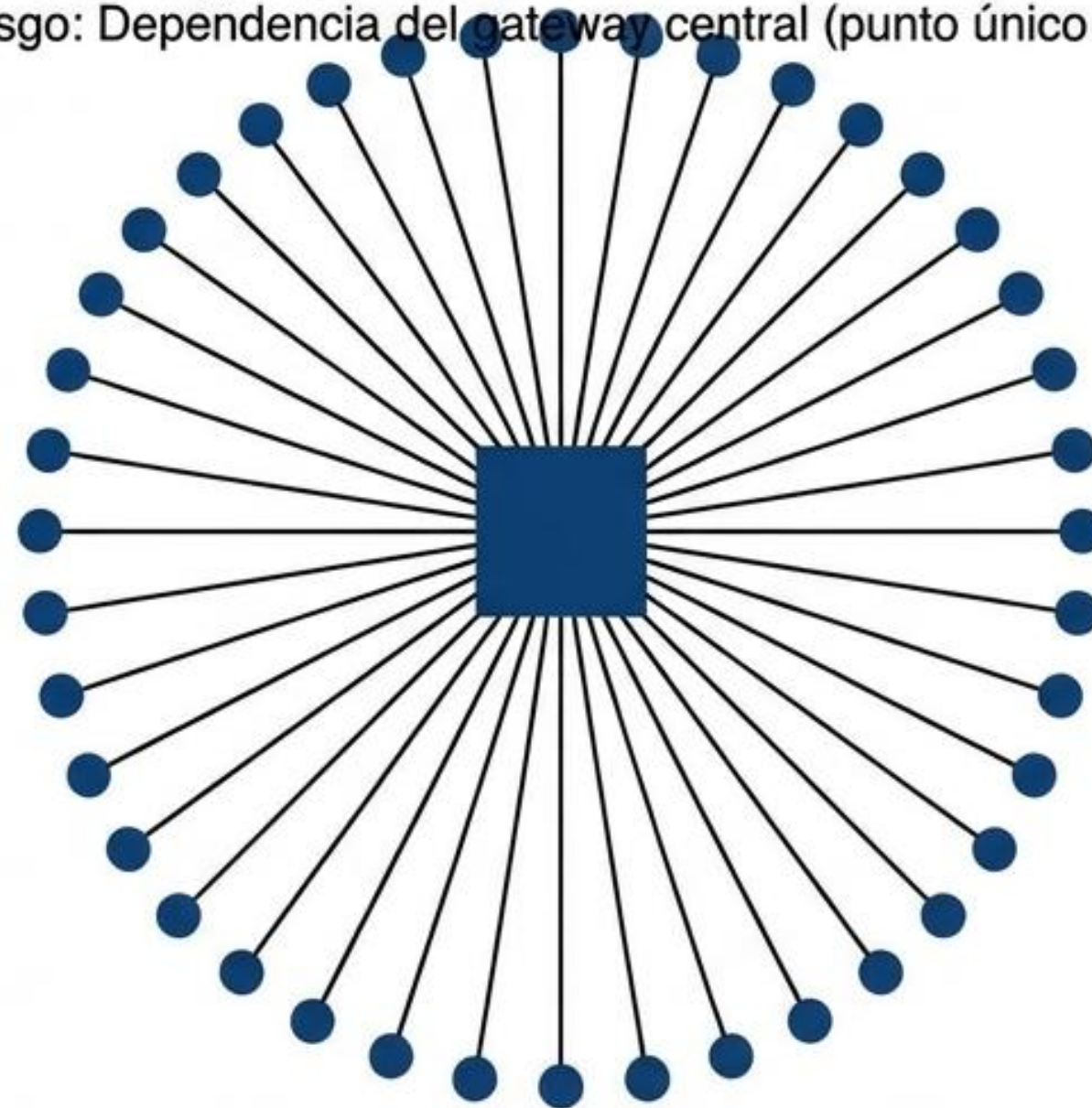
Topología en Malla / Mesh

El dato salta de nodo en nodo. Supera obstáculos geográficos.
El coste: Consumo severo. Los nodos actuando como routers no pueden entrar en deep sleep permanente.



Topología Estrella / Star

Cada nodo se conecta directo a la estación base.
La ventaja: El nodo transmite y duerme inmediatamente.
Eficiencia energética extrema.
El riesgo: Dependencia del gateway central (punto único de fallo).



LoRaWAN (Espectro No Licenciado)

Modulación CSS, alta inmunidad al ruido. Soberanía total de la red.



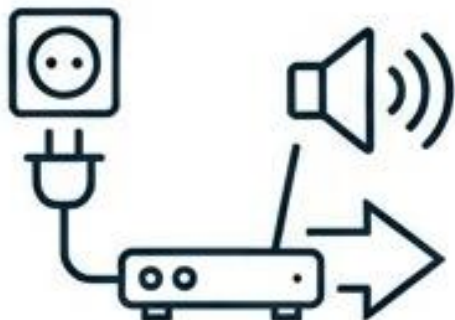
Clase A - All Devices

Consumo mínimo. Ventanas de recepción cortas solo después de transmitir (ALOHA). Para el 95% de la sensórica de batería.



Clase B - Beacon

Ventanas programadas síncronas con balizas del gateway. Latencia predecible, ligero sacrificio de batería.



Clase C - Continuous

Receptor siempre abierto. **Escucha continua sin latencia.** Solo para equipos conectados a la red eléctrica (actuadores, farolas).

NB-IoT / LTE-M (Espectro Licenciado 3GPP)

La infraestructura la aporta la operadora celular.

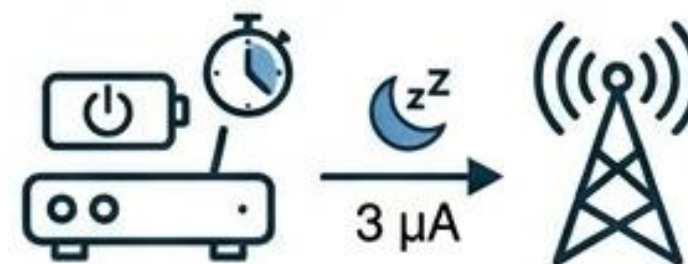
Arquitectura

- Alta penetración estructural.
- Sin **gateways** propios (Soberanía delegada al operador celular).
- Requiere SIM (atención al consumo parásito de SIMs físicas vs eSIMs soldadas en PCB).



Mecanismos de Ahorro





















- **PSM** (Power Saving Mode): Radio apagada físicamente, pero lógicamente registrada en la torre. Evita handshakes masivos al despertar. (Consumo: $3 \mu\text{A}$).



- **eDRX** (Extended Discontinuous Reception): Ciclos ampliados de paginación para recibir comandos desde la nube con latencia controlada.



Master Connectivity Matrix

	Wi-Fi	Zigbee	LoRaWAN	NB-IoT	Sigfox
Rango / Cobertura					
Ancho de Banda					
Autonomía Batería					
Soberanía de Infraestructura					
	Edificios conectados	Domótica mesh	Redes territoriales propias	Puntos dispersos sin gateway propio	Mensajes mínimos

Texto Estructurado - JSON

```
{  
  "temperature": 24.5  
}
```



Serialización Binaria

```
0CB206610B010205E1
```



Más de 50 bytes. Altamente ineficiente. Prolonga el Time-on-Air, congestiona el canal y drena la batería. **Estrictamente prohibido en el extremo LPWAN.**



Apenas 7 bytes binarios. El decoder en la nube reconstruye la semántica. Reduce el uso del espectro de radio y batería en un >80%. El aire es caro; el procesamiento en la nube es barato.

Orquestación de Flotas: LwM2M vs MQTT

	LwM2M	MQTT
Transporte	UDP - Sin conexión, bajo overhead	TCP - Orientado a conexión, requiere handshake de 3 vías
Eficiencia Inicial	Transfiere un 72% menos de datos en la conexión inicial.	Alto consumo por establecimiento de sesión TLS.
Firmware OTA	Nativo, transferencias fragmentadas por bloques CoAP	No estandarizado

Key Insight:

Insight: En flotas de 500+ nodos, MQTT obliga al módem celular a permanecer encendido cientos de milisegundos extra solo para gestionar sesiones TCP/TLS, acortando la vida del nodo.

Spec 01: Nivel de Río (Cuenca del Miño)

Prioridad: Supervivencia operativa extrema, diagnóstico de fallos, dato crítico.

Sensor: Sonda industrial de radar 80 GHz. (Inmune a viento/temperatura).

Interfaz: 4-20 mA. (Robustez en cable largo hasta el nodo).

Energía: Batería de gran formato + Panel Solar sobredimensionado.

Conectividad: LoRaWAN Privado (Clase A). Soberanía total para garantizar la alerta en episodios críticos sin depender de antenas de operadoras caídas.



Spec 02: Smart Parking Urbano

Prioridad: Coste unitario mínimo, escalabilidad a miles de plazas.

Sensor: Magnetómetro embebido / radar miniaturizado.

Estrategia de Envío: Reporte por Evento. El nodo duerme, solo transmite si hay cambio de estado (ocupado/libre) + keepalive diario.

Conectividad: LoRaWAN o NB-IoT (según cobertura urbana y densidad).

Spec 03: Viñedo Rías Baixas

Prioridad: Dato agronómico, vastas extensiones geográficas.

Sensor: Humedad de suelo, hoja, radiación.

Interfaz: Bus SDI-12. (Permite conectar 10 sensores al mismo nodo con un solo cable, consumo de reposo $<15 \mu\text{A}$).

Conectividad: LoRaWAN. (Gateway propio en cota alta iluminando la finca).

Un Gemelo Digital territorial empieza siendo una cadena disciplinada de captura física, supervivencia energética y logística de radio.

Sin una Capa 0 (Física) y Capa 1 (Red) robustas y diseñadas arquitectónicamente, el modelo digital superior colapsa, limitándose a digitalizar y procesar incertidumbre.