

Xarxes de Sensors cap al monitoratge dels edificis

Lluís Jofre (jofre@tsc.upc.edu)

Gemma Roqueta (gemma.roqueta@tsc.upc.edu)



Departament de Teoria
del Senyal i Comunicacions



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Comissió de Construcció del Col·legi d'Enginyers Industrials
23 de Febrer de 2010

Índex

1. Introducció:
 - Precedents
 - Objectius
 - Punts clau
 - Xarxa de sensors wireless
2. Sensors:
 - Principi de funcionament
 - Jerarquia del sistema de sensors
 - Classificació dels tipus de sensors
 - Sensors per a la mesura de paràmetres físics
 - Sensors estructurals
3. Arquitectura de les xarxes de sensors
4. Paràmetres de les xarxes de sensors wireless
5. Etiquetes RFID
6. Exemple d'aplicació

Precedents I

- Avui en dia, l'evolució de les telecomunicacions (posicionament GPS, per satèl·lit i RFID, eines d'informació geogràfica –GIS-, comunicacions mòbils de dades, software i sistemes intel·ligents per a l'ajuda en la presa de decisions...) i la informàtica permeten una combinació d'aspectes que fan les TIC apropiades per entrar en el món de la construcció oferint grans beneficis.

Precedents II



Detecció de defectes i fisures en estructures de formigó.

Ref: Universitat de California Irvine, UPC



Monitoratge de túnels durant el procés de construcció (humitat, vibració, esforços de compressió...) i sistema de comunicació de banda ampla (domòtica de túnels)
Ref: IFERCAT, Telecom UPC



“Arranca en Barcelona la primera línia de Metro de España sin conductor”. El Mundo, 14-12-09

Microwave Reflection Tomographic Array for Damage Detection of Civil Structures (Yoo Jin Kim, Luis Jofre, Franco De Flaviis and Maria Q. Feng). IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 51, no. 11, November 2003

Lectorcam: Barcelona 2010

Infraestructures Comunes de Telecomunicacions (ICT) en els edificis: televisió satèl·lit, telefonia, Internet...



Llei 10/2005: En conseqüència, i d'acord amb la normativa específica catalana en matèria d'ICT, els projectes tècnics d'ICT i les certificacions d'obra hauran de ser **signats per un enginyer o un enginyer tècnic de telecomunicació**.

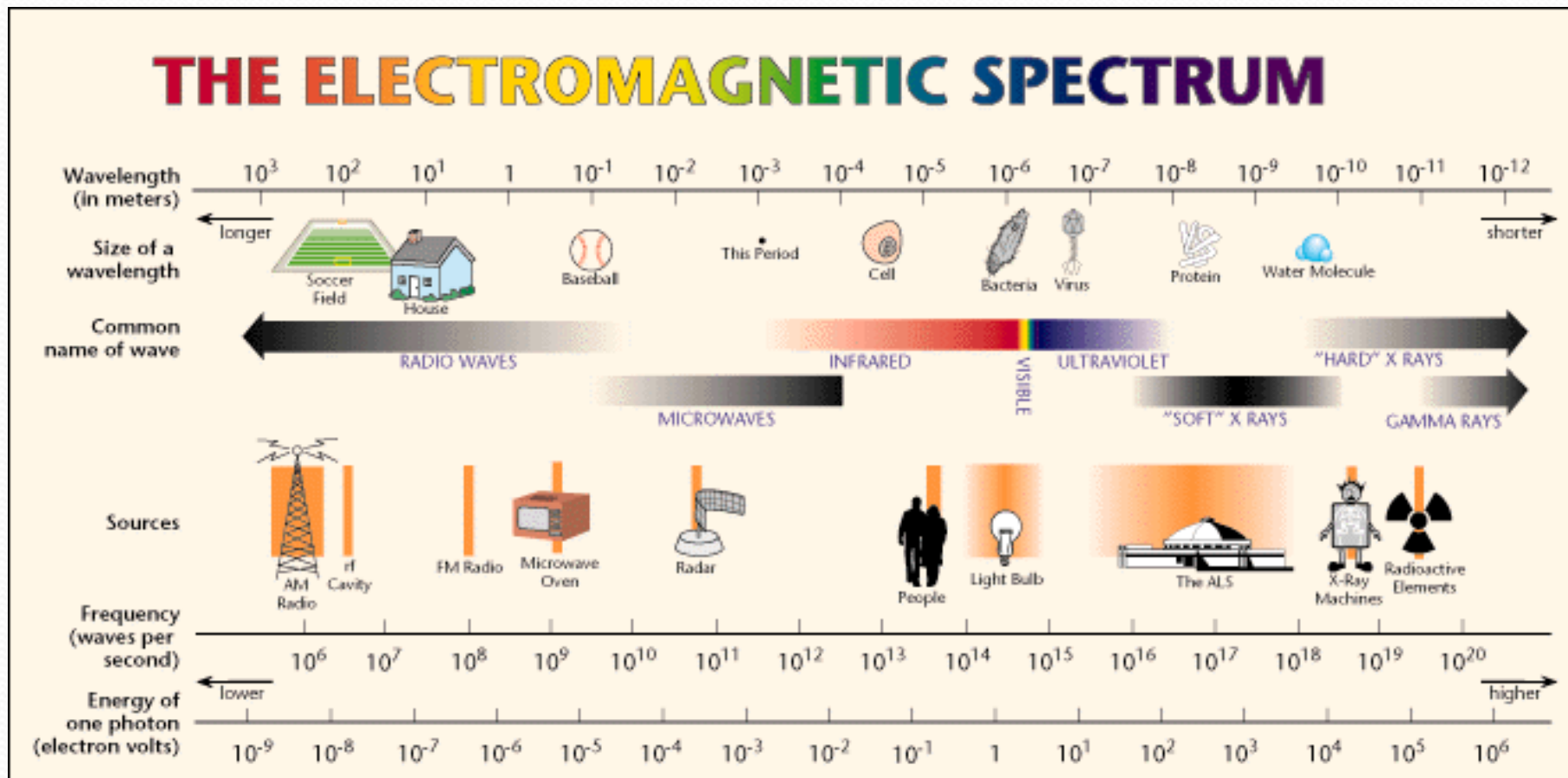
Objectius

- Xarxa de sensors wireless per al monitoratge continuat d'edificis.
- Necessitats en instal·lacions: Domòtica
 - Estalvi d'energia: sensors de temperatura, humitat
 - Il·luminació: sensors d'il·luminació
- Necessitats en estructures d'edificis industrials:
 - Mesures d'esforços: sensor col·locat estratègicament. Possibilitat d'emmagatzemar historial de pics (alarma de màxims).
 - Mesura de desplaçaments horitzontals en el formigó prefabricat
 - Mesura d'humitat, temperatura i gasos (CO₂) com a indicadors del procés de carbonatació de les estructures de formigó.
 - Instal·lació de targetes RFID per emmagatzemar totes les especificacions de les peces i eventualment, informació de l'historial de varis resultats dels sensors.

Punts clau

- L'espectre electromagnètic.
- Arquitectura de les xarxes de sensors: antenes, alimentació, autonomia, protocol de comunicació.
- Freqüències: cobertura, mida de les antenes.
- Wireless: abast, qualitat d'informació intercanviada, protocols.
- Consum, freqüència de transmissió (cada hora, un cop al dia...).

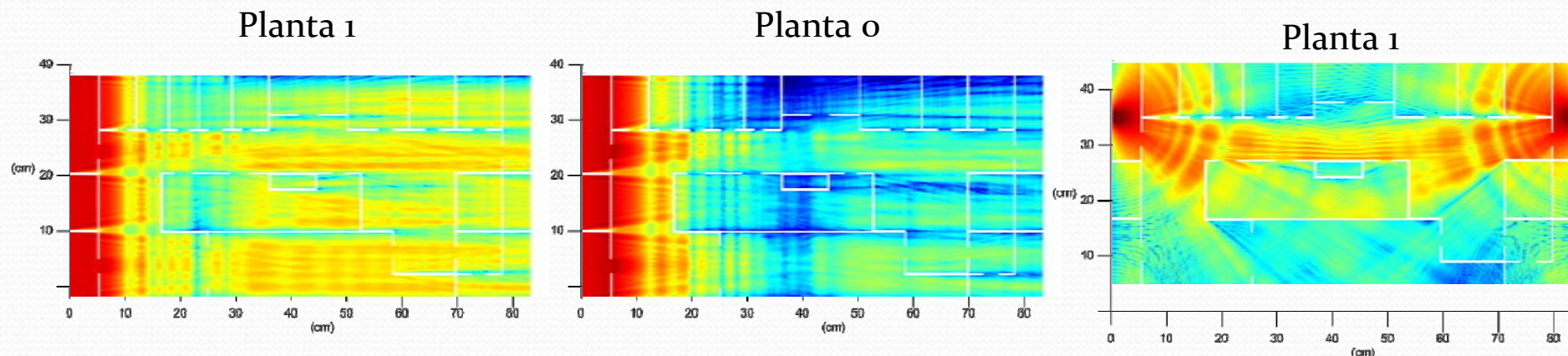
L'Espectre Electromagnètic



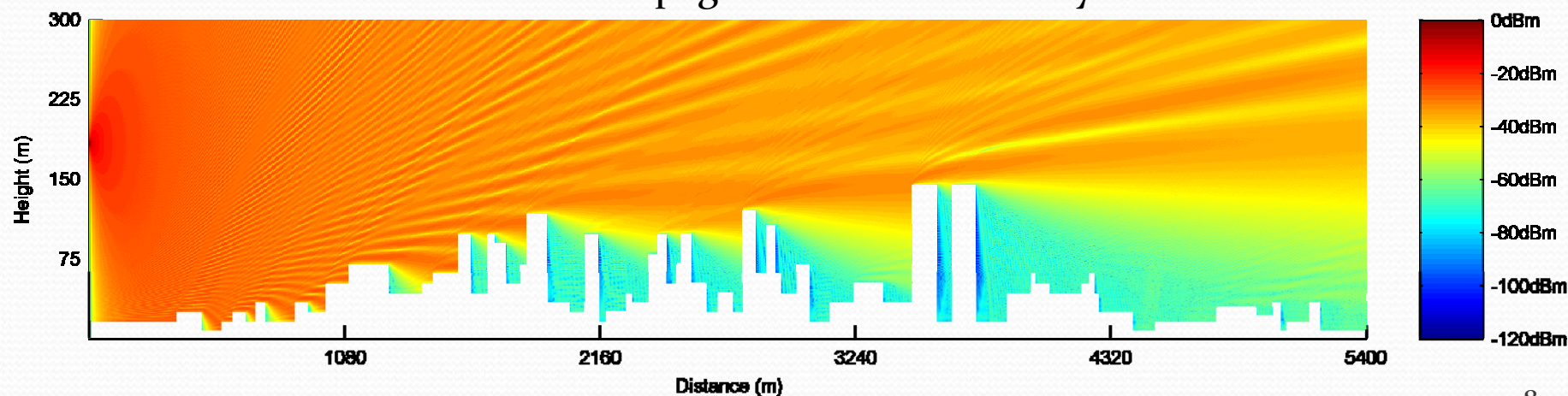
(source: ALS-Berkeley)

Principi de Funcionament

- Comunicació sense fils entre dispositius mitjançant **ones ràdio (freq=2.45GHz)**
 - Un repetidor exterior a l'edifici, situat a 15 m d'alçada
 - Dos repetidors interiors a l'edifici



Outdoor Radio Propagation - Barcelona Skyline



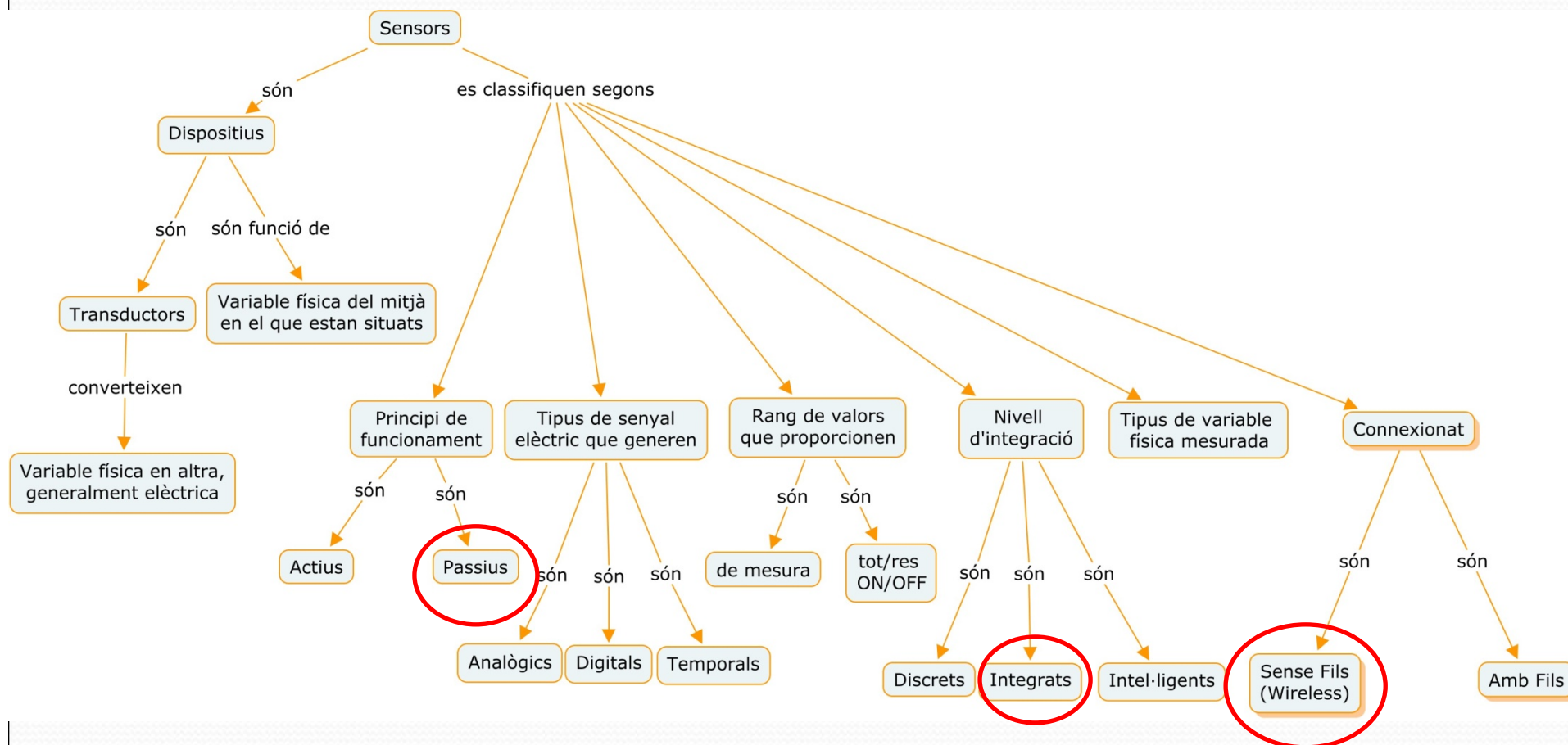
Jerarquia del sistema de sensors

Processament de la informació
NIVELL C

Comunicació entre sensors i amb
el gestor remot: ones ràdio (Abast,
Capacitat de travessar materials:
aigua, formigó, aire...)
NIVELL B

Nivell electrònic: mida dels
sensors, entorn, pressions que han
de suportar, variables que han de
mesurar (posició, pressió,
temperatura, humitat, pH...)
NIVELL A

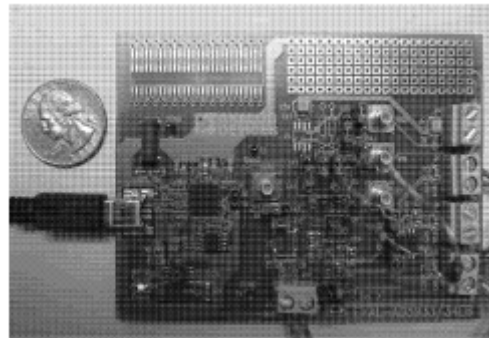
Classificació dels tipus de sensors



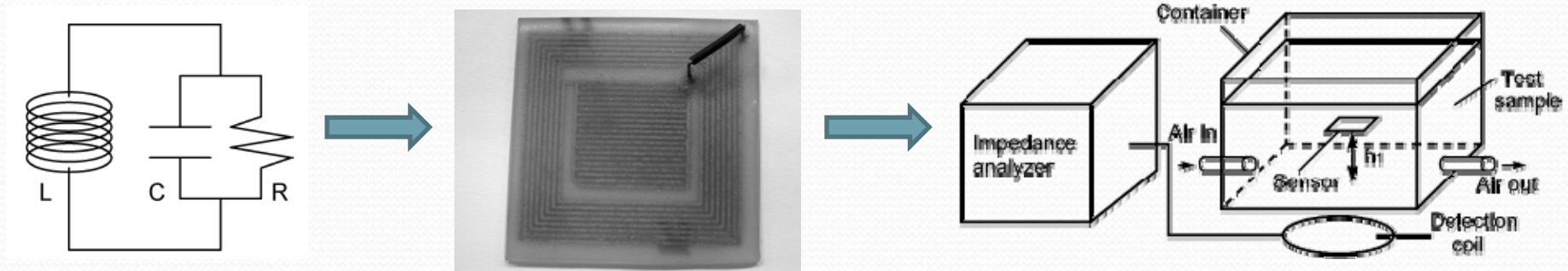
Sensors per mesurar paràmetres físics

- **Sensor de l'estat de salut del formigó.** “A Self-contained Active Sensor System for Health Monitoring of Civil Infrastructures” ,Park, Seunghee Yun, Chung-Bang Inman, Daniel J., IEEE 5th Conference on Sensors, 2006.

Chip mesurador
d'impedància



- **Sensor del contingut d'aigua a temps real.** “A Wireless, Passive Embedded Sensor for Real-Time Monitoring of Water Content in Civil Engineering Materials” Ong, J.B., Zhanping You, Mills-Beale, J., Ee Lim Tan, Pereles, B.D., Keat Ghee Ong, Sensors Journal IEEE 2008.



Sensors per mesurar paràmetres físics

- Water pressure and temperature sensor. Kiowa Company



Embedded in a boring or together with a pile or steel sheet pile, BPB-A/BPB-A-T series transducers measure pore water pressures or pore pressures. If desired, they can be used as pressure-based underground water level transducers by installing in a well. They can be supplied with desired cable lengths. The BPB-A-T series are provided with temperature measuring function for simultaneous measurement of pore pressure and temperature. The cable length may be changed as specified.

- Soil pressure sensor. Kiowa Company



The BEE-A and BEF-A series are soil pressure transducers with an outer diameter of 200 mm which are used most popularly in measuring fields. The BEE-A series for underground soil pressure measurement are embedded in a core zone of a rockfill dam or ordinary banking. The BEE-A series can also measure soil pressure of 3- or 4-face objects. The BEF-A series can be used for soil pressure measurement of a continuous underground earth retaining wall.

Sensors estructurals I

- Sensor d'inclinació. Kyowa company

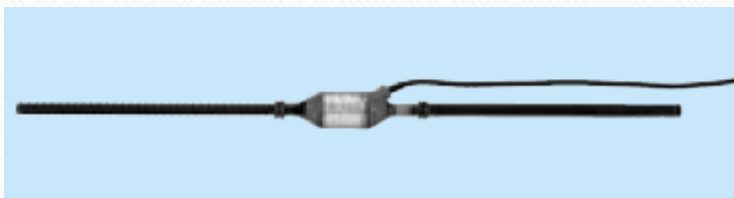


The BKJ-A series inclination transducers are designed for embedment at multiple stages in a boring or earth retaining wall. Inclination angles detected at multiple stages enable measurement of lateral displacement of the ground or

earth retaining wall. Since the embedment method ensures quicker measurement than the insertion method, the BKJ-A series is suitable for use in information-oriented urban civil engineering fields.

The BKJ-A series can be installed at maximum 20 stages in an aluminum guide pipe embedded beforehand.

- Sensor de tensió. Kyowa company



The BF-CT series stress transducers are designed for stress measurement by welding both ends to a reinforcing bar in the field. They are available in various models for selection according to diameters of the reinforcing bars. Each model provides a temperature measuring function to enable simultaneous measurement of stress and temperature.

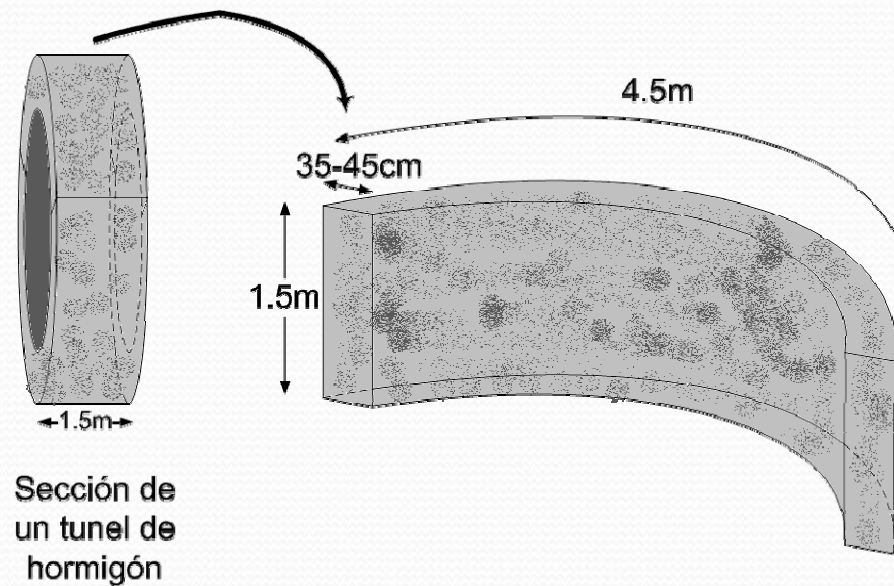
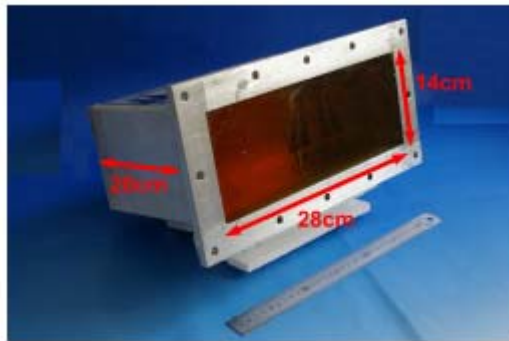
Sensors estructurals II

- Sensor d'esforços i temperatura per fibra òptica: "Fiber optic nerve systems for smart materials and smart structures", Hotate, K., Microwave Photonics 2008 & Asia-Pacific Microwave Photonics Conference 2008, Page(s):31 - 34
- Sensor d'esforços: galgues extensomètriques



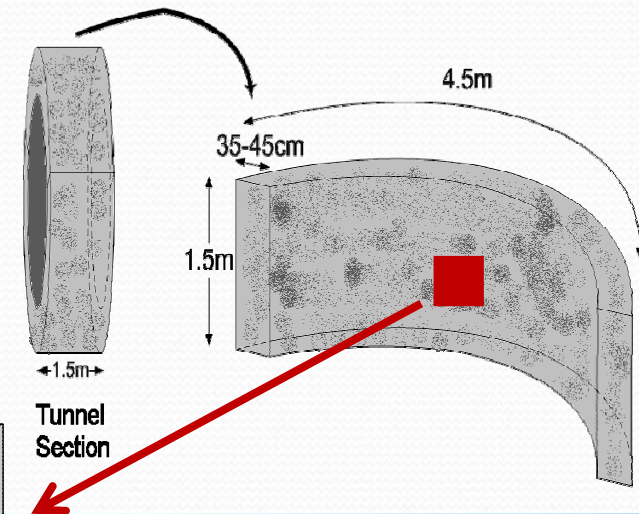
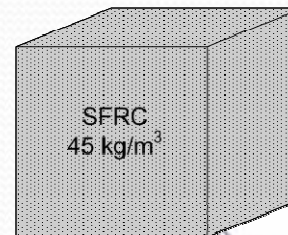
Sensors estructurals III

- Sensor de la densitat de fibres en formigó reforçat amb fibres. “Transmission Approach for Near-Field Non Destructive Characterization of Steel Fiber Reinforced Concrete at Microwave Frequencies”, Gemma Roqueta, Jordi Romeu and Lluís Jofre, UPC, ICONIC 2009, Taiwan.



Sensor de la densitat de fibres en el formigó

- Objectius i requeriments:
 - Determination of the variability of dielectric properties of individual SFRC blocs during the pouring process.
 - Microwave Imaging to determine the fiber content of a SFRC structure at different pouring moments.

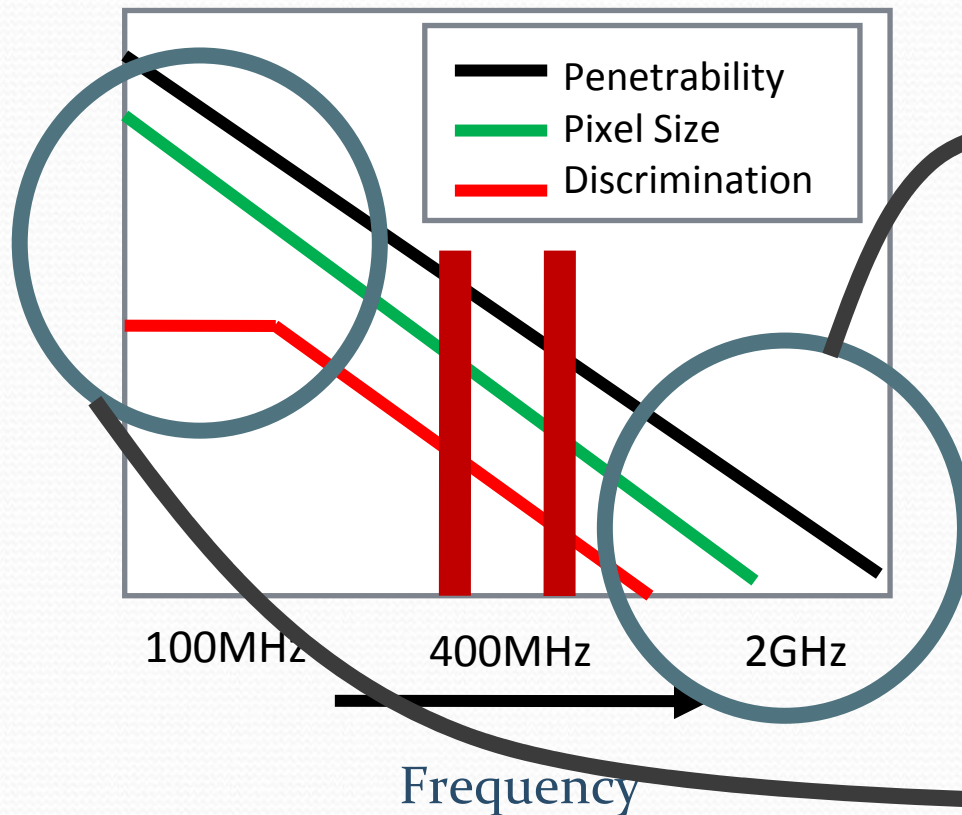


- Penetració ≥ 50 cm
- Discriminabilitat: 5 kg/m³
- Resolució: 30x30 cm²



Sensor de la densitat de fibres en el formigó

- Decisió de la banda de freqüències



High Frequencies:

- ✗ The penetrability decreases
- ✓ The pixel resolution size decreases (proportional to the antenna aperture size)
- ✗ The discriminability decreases

Problems at the resonant frequency!

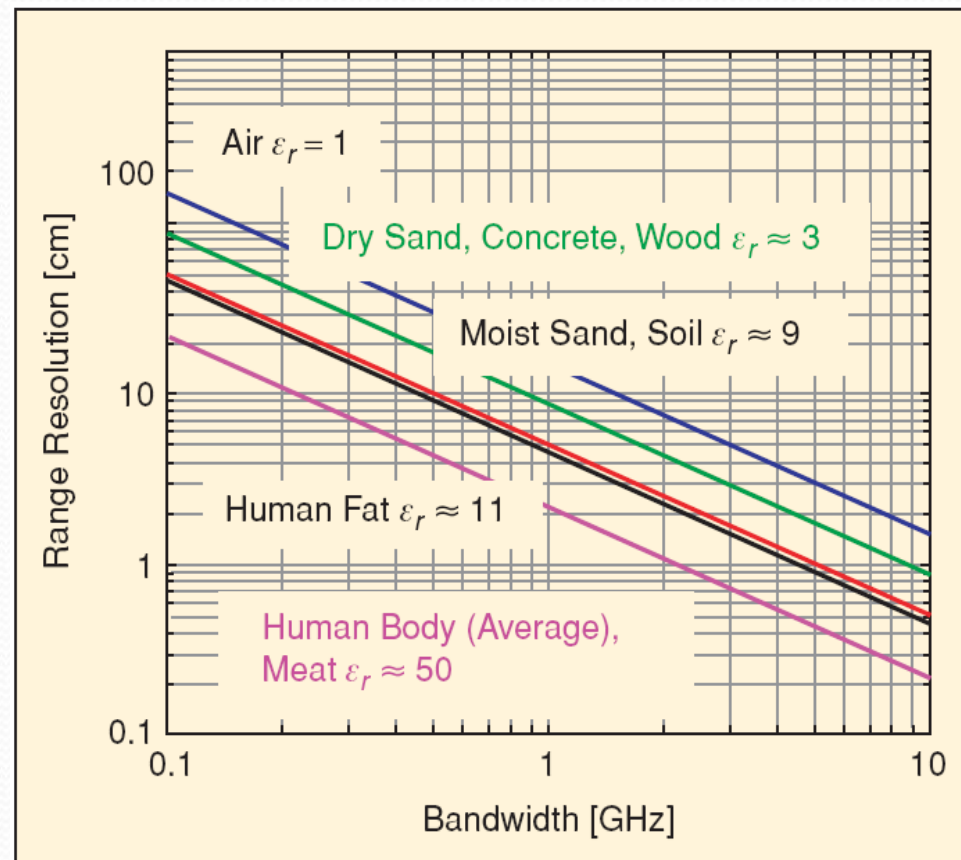
Low Frequencies:

- ✓ The penetrability increases
- ✗ The pixel resolution size increases
- ✓ The discriminability remains constant and high

Compromís! Banda 350MHz-650MHz

Sensor de la densitat de fibres en el formigó

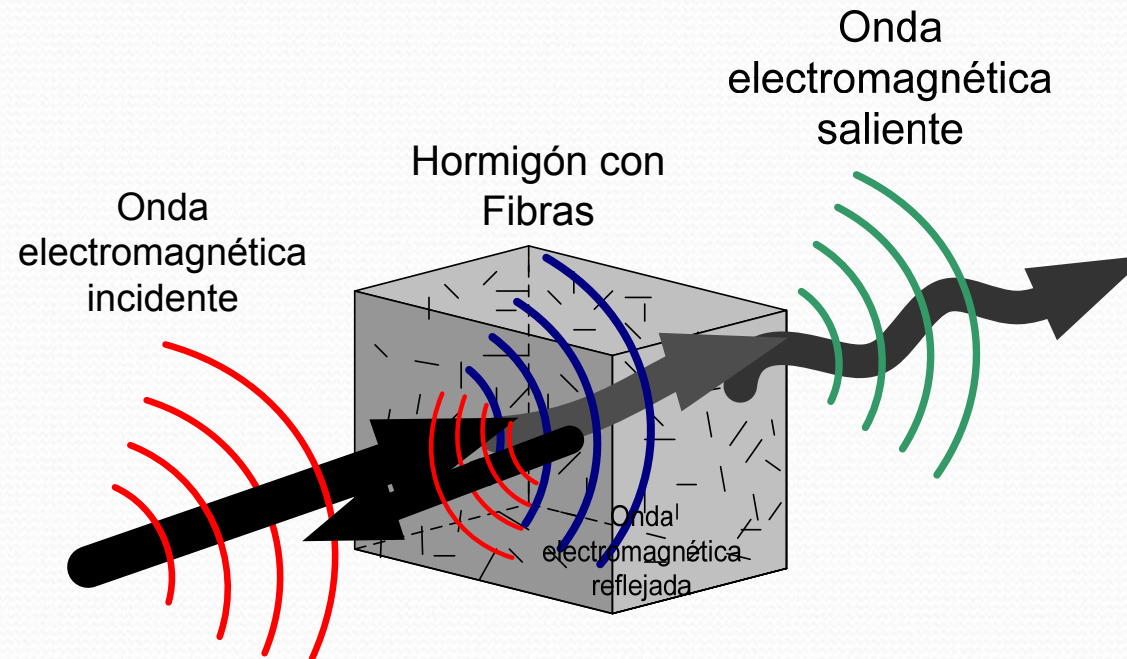
Range resolution vs bandwidth in different materials



Ref. R. Zetik, J. Sachs, R.S. Thomä, "UWB Short-Range Radar Sensing",
IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, April 2007, pp. 39-45
Ilmenau University of Technology, Germany

Sensor de la densitat de fibres en el formigó

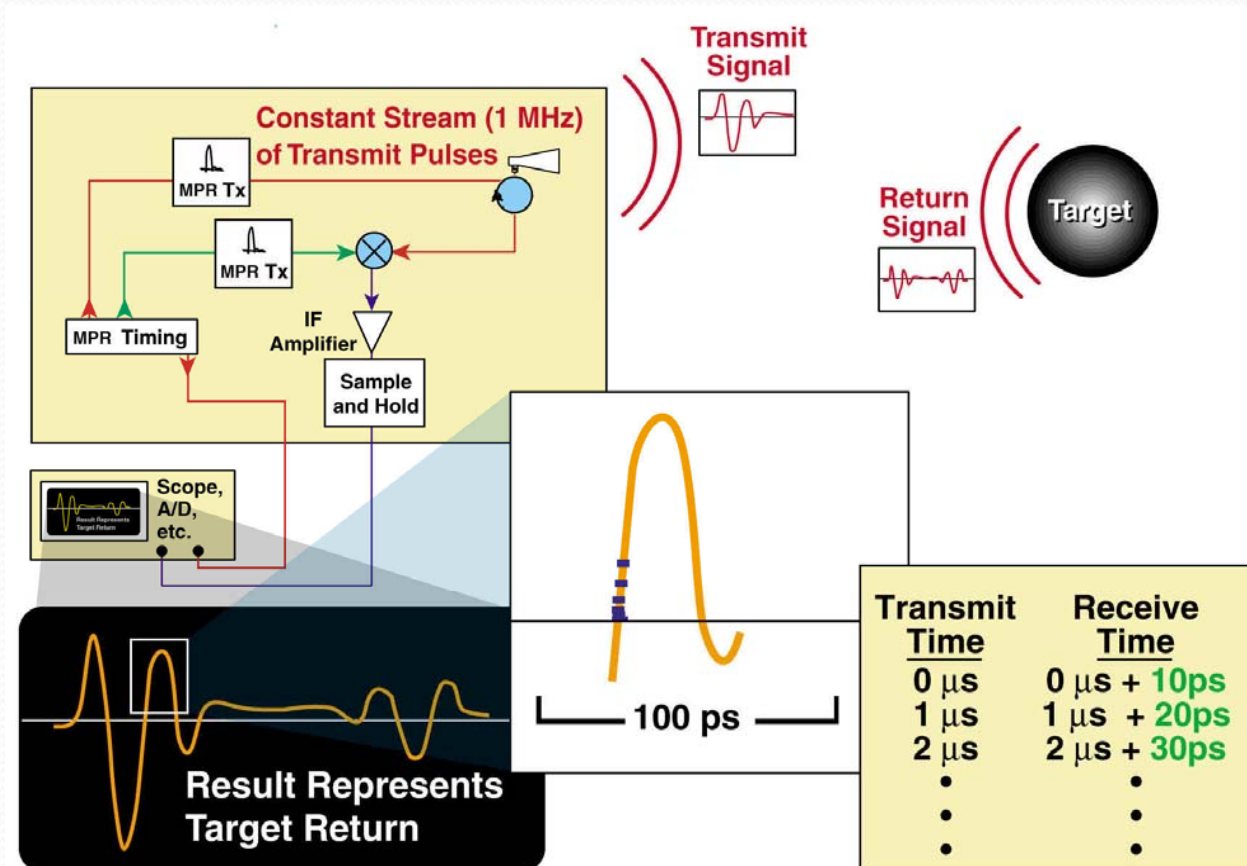
- Fonaments



- Les ones canvien les seves propietats en atravessar el formigó amb fibres. En particular, la velocitat i l'amplitud.

Sensor de la densitat de fibres en el formigó

- Potencial de les xarxes Wireless UWB



Sensor de la densitat de fibres en el formigó

- Transmissió o Reflexió?

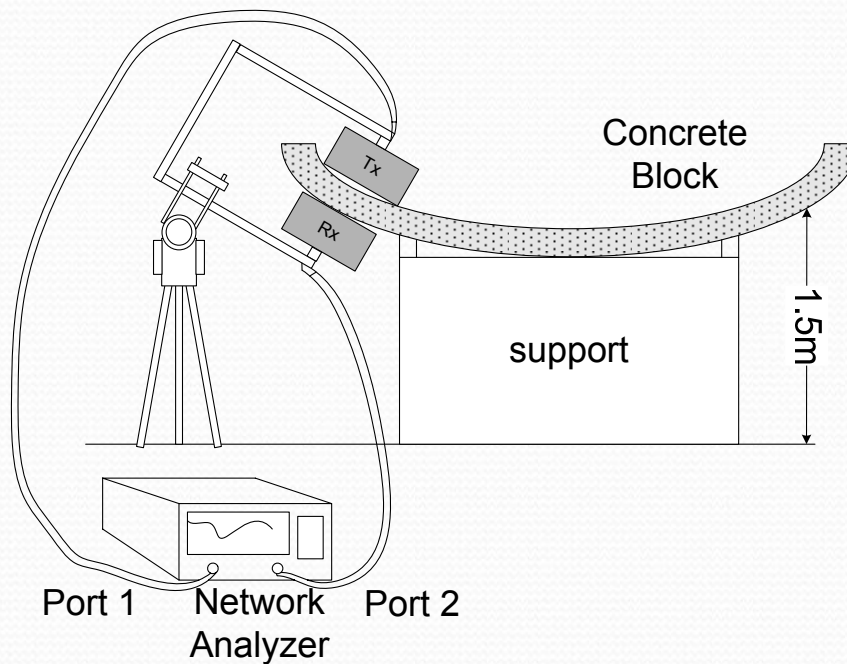


Fig: Transmission Configuration

- **Transmission:**

PROS:

- Technological Feasibility

CONS:

- Application difficulty

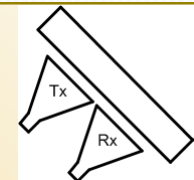
- **Reflection:**

PROS:

- Application feasibility

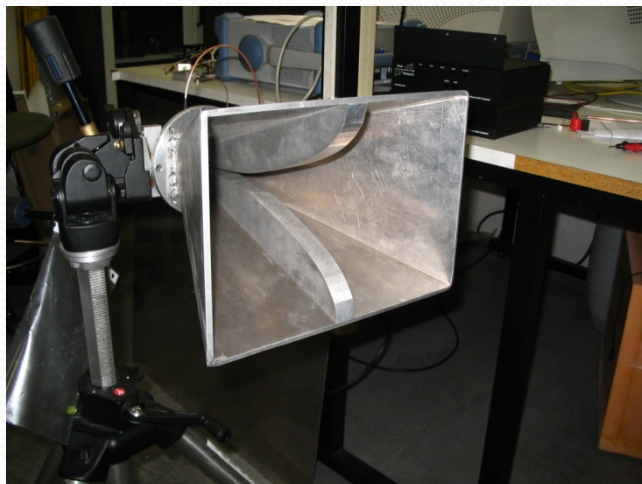
CONS:

- Technological difficulty

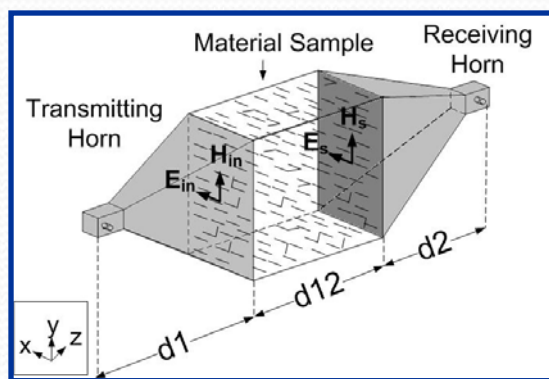
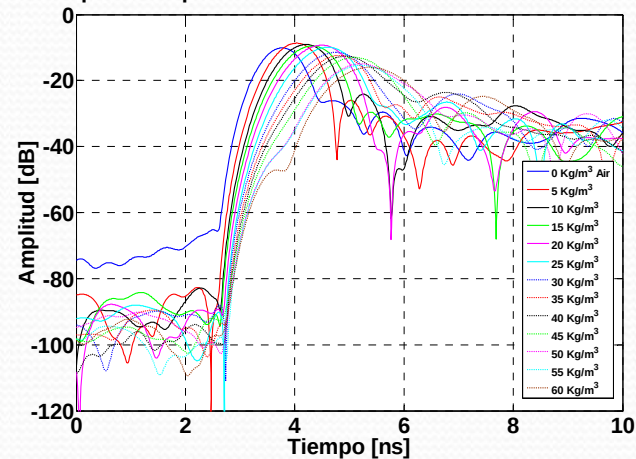


Sensor de la densitat de fibres en el formigó

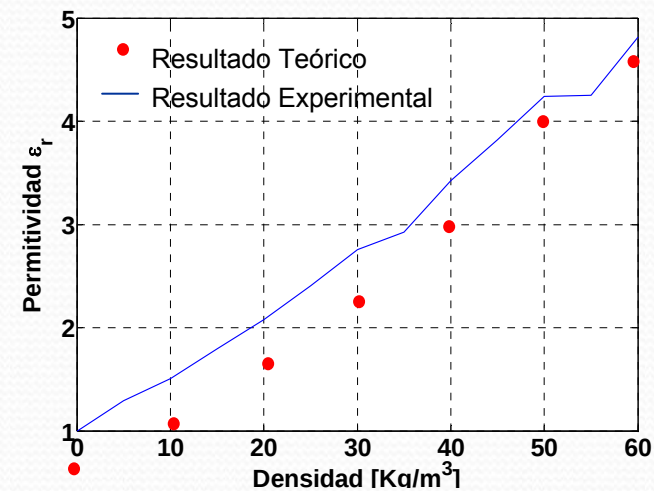
- Antenes RF. Resultats preliminars



Respuesta Impulsional en Función de la Densidad de Fibras



Permittividad en función de la densidad de fibras

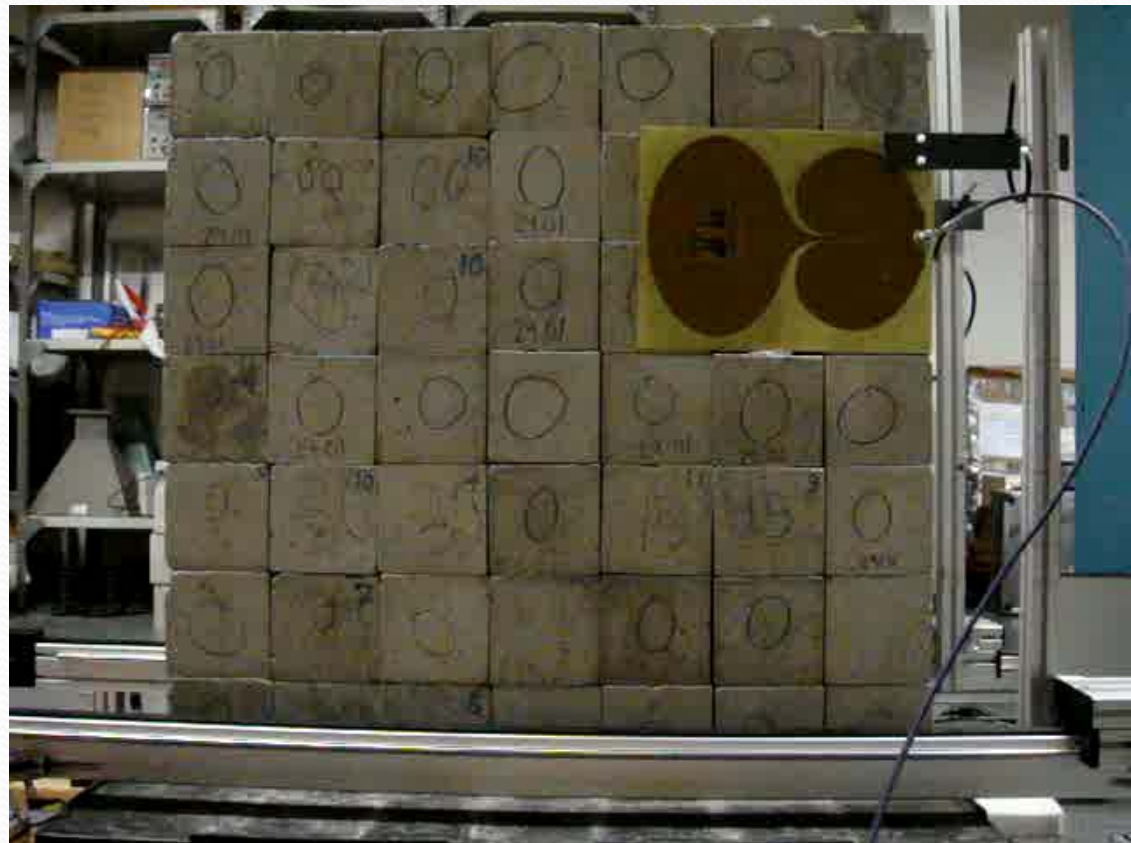
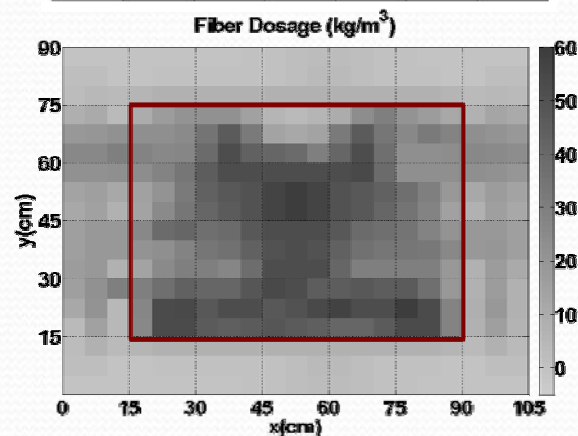


Sensor de la densitat de fibres en el formigó

- Sensor de la densitat de fibres en formigó reforçat amb fibres.

Density map

0	0	0	0	0	0	0
0	15	60	30	60	15	0
0	30	45	60	45	30	0
0	30	30	60	30	30	0
0	60	45	45	45	60	0
0	0	0	0	0	0	0



Sensors estructurals IV

- Short Range Transversal Imaging



Fig. 8. Scanning of a brick wall structure by a pair of UWB antennas.

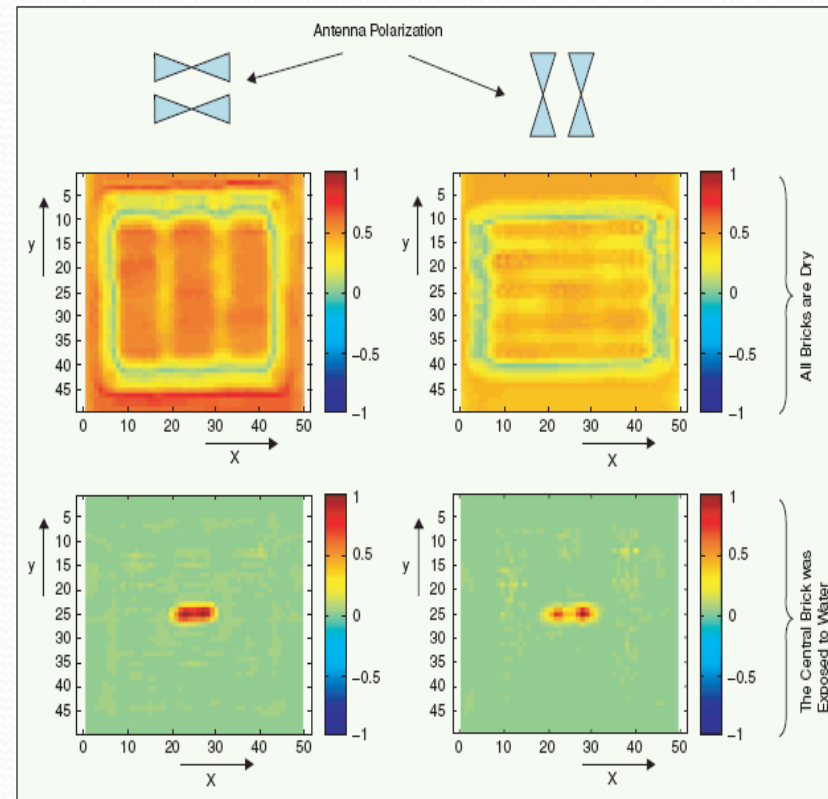


Fig. 9. UWB image of a scanned brick wall structure.

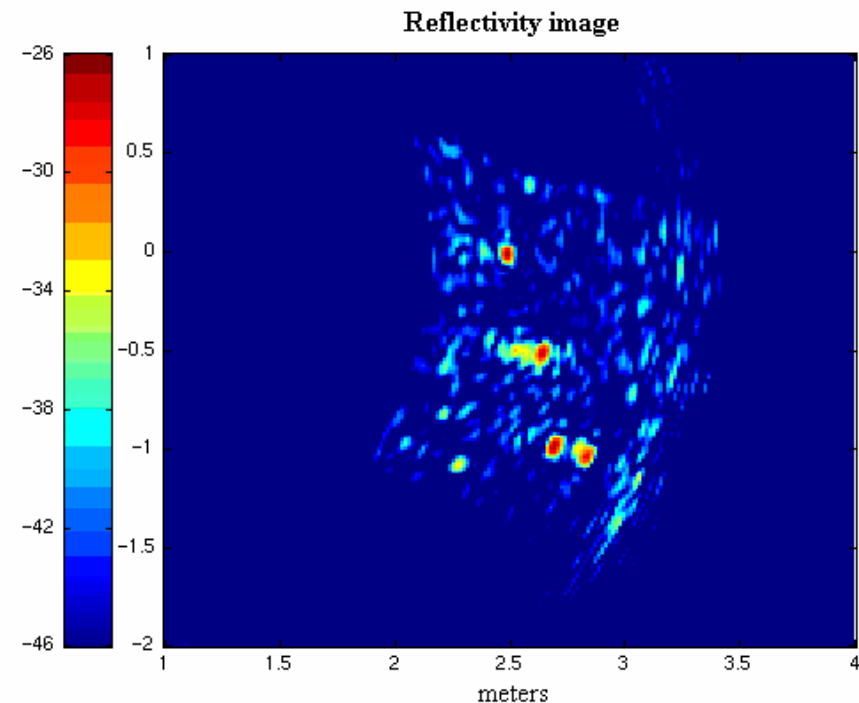
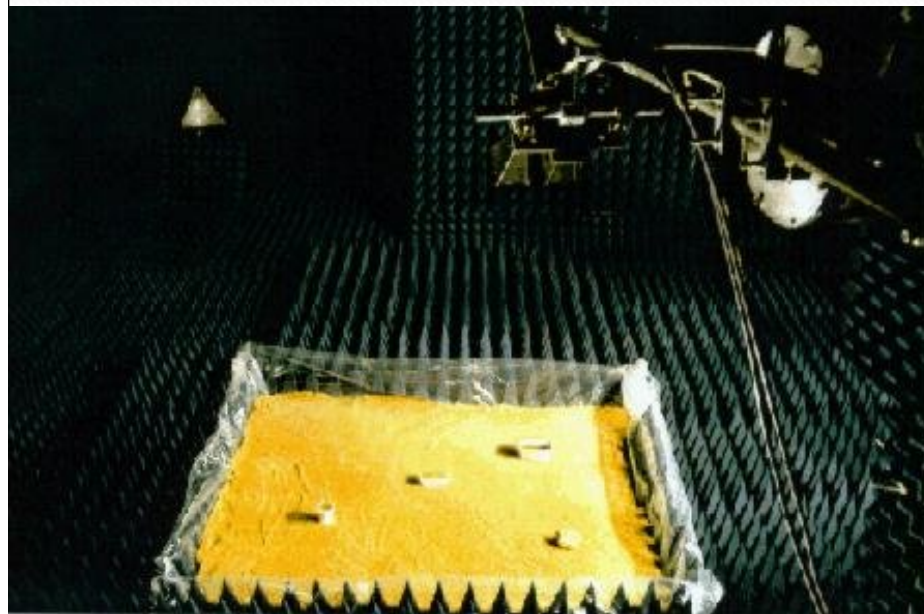
R. Zetik, J. Sachs, R.S. Thomä, "UWB Short-Range Radar Sensing",
IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, April 2007, pp. 39-45
Ilmenau University of Technology, Germany

Sensors estructurals V

- Circular-SAR Images: (Mines detection)

HH Polarization

Frequency Band:12-16GHz



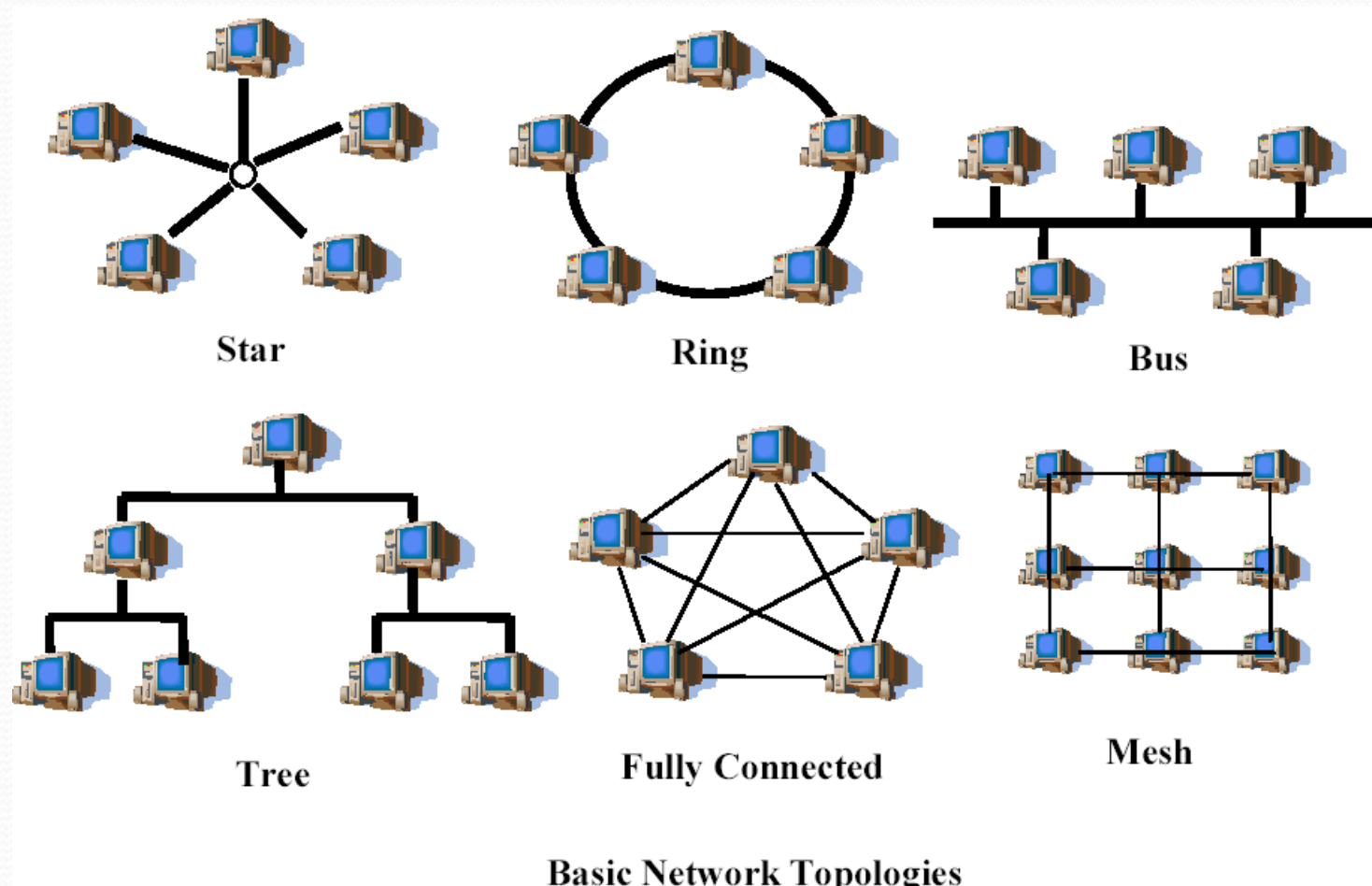
Sensors Wireless polivalents

- Obtenció d'informació de l'entorn
 - Llum, moviment, pressió, temperatura, pH, tensió, posició...
- Aplicació:
 - Monitoratge de l'entorn, vigilància, seguiment d'objectes...

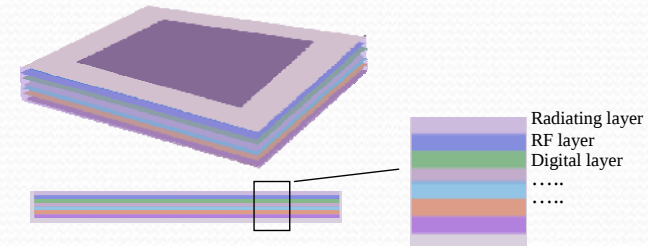
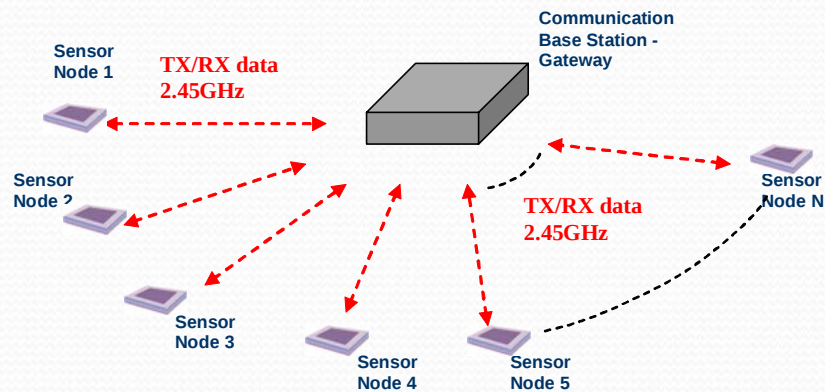


2.4 GHz G-Link® Wireless
Accelerometer Node
www.microstrain.com

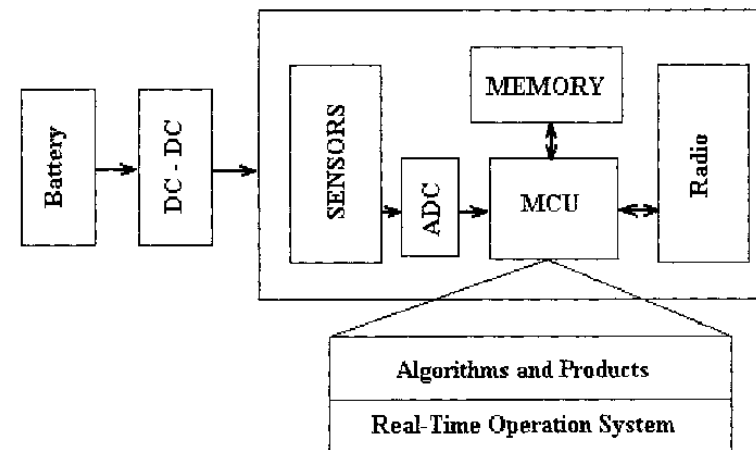
Topologia de les xarxes de sensors



Estructura dels nodes



- Sensing subsystem
- Microcontroller
- Radio transceiver
- Small antenna
- Power supply subsystem

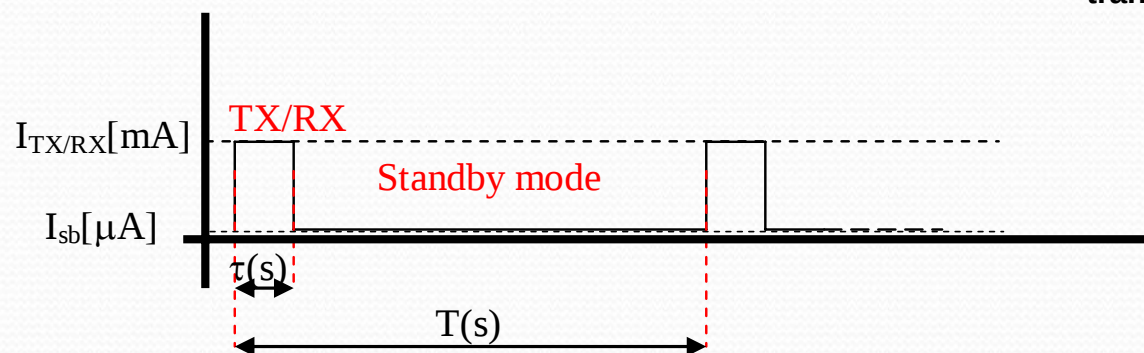


Short Range Wireless Radio Systems

- Condicions electromagnètiques i de propagació específiques ($\neq$ GSM, GPS, etc.)
- Cicle de treball baix, volum reduït $\rightarrow$ consum de potència molt baix $\rightarrow$ bona autonomia.



Integrated short range wireless transceiver size~20x20x2mm



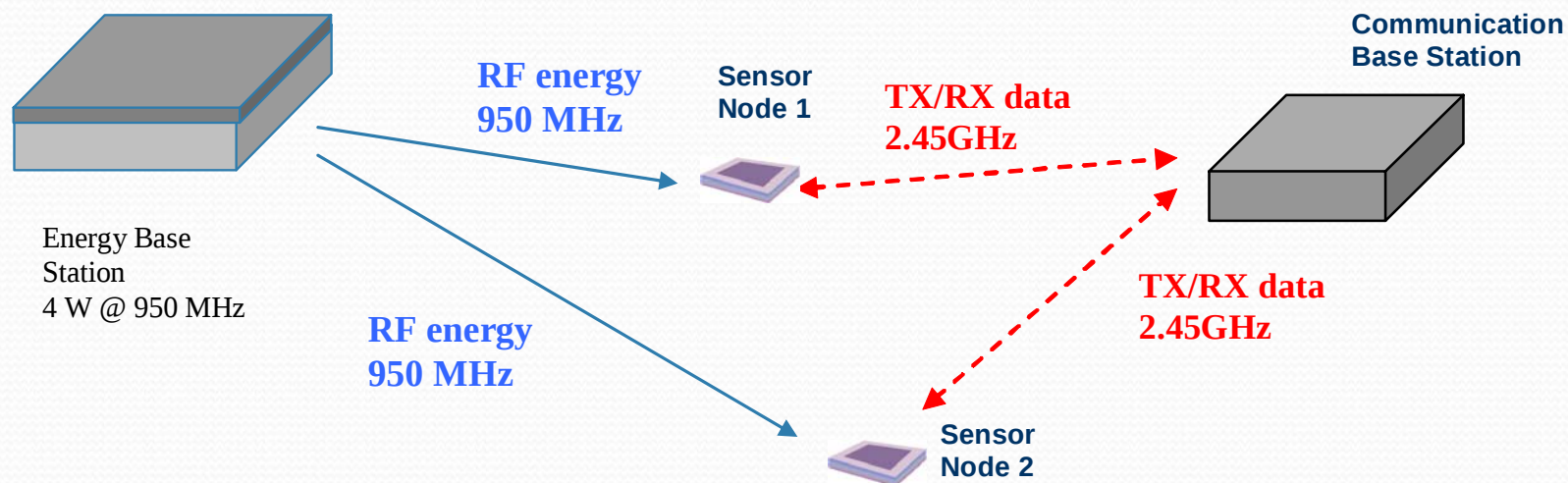
Alimentació per a sensors autònoms

- Energia tèrmica
- Energia solar
- Vibracions
- Vent
- Energia RF

L'elecció depen de l'aplicació. Per aplicacions indoor (formigó) → Recol·lecta d'energia per RF scavenging (harvesting)

Alimentació per a sensors autònoms

- Recol·lecta d'energia per scavenging (harvesting)
- Baix consum (flux de dades baix, cicle de treball baix) però encara existeix la limitació de la vida útil de les bateries (2-3 anys).



Exemple de càlcul de consum

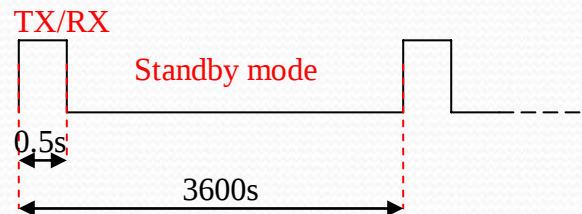
- Xip nRF24E1 de Nordic Semiconductors

Extremely low current consumption	
Datarate -mode	Current consumption mA
<i>TX @ -5dBm POUT - 10kbit/sec continuous - burst mode</i>	<i>0.8mA</i>
<i>TX @ -20dBm POUT 1Mbit/sec</i>	<i>8.8mA</i>
<i>TX @ -10dBm POUT 1Mbit/sec</i>	<i>9.4mA</i>
<i>TX @ -5dBm POUT - 1Mbit/sec</i>	<i>10.5mA</i>
<i>TX @ 0dBm POUT - 1Mbit/sec</i>	<i>13mA</i>
<i>RX - receiving on one channel 1Mbit/sec</i>	<i>19mA</i>
<i>RX -receiving simultaneously on two channels 1Mbit/sec</i>	<i>25mA</i>
<i>Supply current for ADC @ 100 KSPS</i>	<i>0.9mA</i>
<i>Supply current for 8051 MCU @ 16 MHz @ 3V</i>	<i>3mA</i>
<i>Complete system standby with timer or external pin wake up</i>	<i>2µA</i>

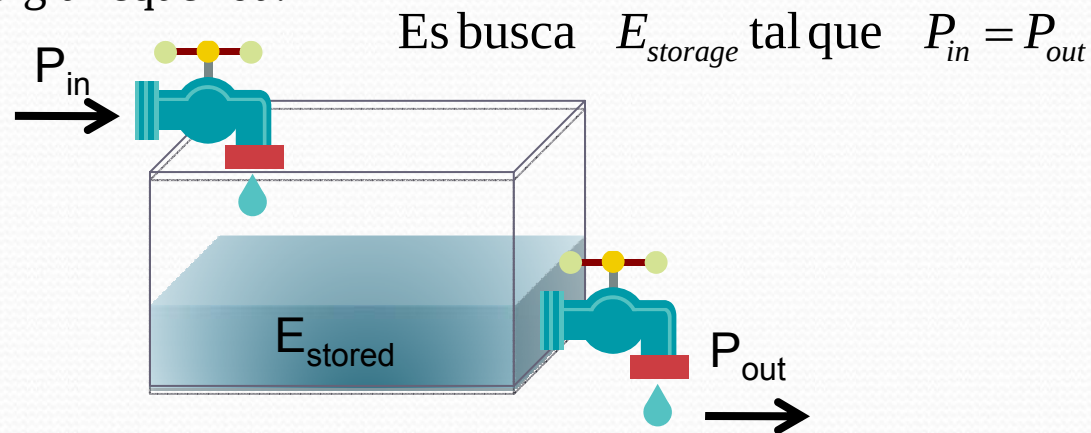
- Minim voltatge subministrat 1.9V, màxim 3.6V

Exemple de càlcul de consum

- Per a l'estimació del consum s'ha de tenir en compte el cicle de treball, que és 0.5seg/h.



- Durant el mode “Standby” el sistema ha de poder emmagatzemar l'energia necessària per transmetre o rebre dades i per proporcionar un mínim de corrent de $2\mu\text{W}$ per a un bon funcionament. Durant el mode de “TX/RX” el sistema ha de poder proporcionar una energia constant raonable pel consum especificat a la taula. Considerant els dos modes diferents de funcionament, es pot fer una estimació preliminar de l'energia requerida.



Exemple de càlcul de consum

- TX/RX mode (consum 19mA):

$$P_{TX/RX(\min)} = V \cdot I = 1.9V \cdot 19mA = 36.1mW$$

$$E_{TX/RX(\min)} = P_{TX/RX(\min)} \cdot t_{TX/RX} = 36.1mW \cdot 0.5s = 18.05mJ$$

- Standby mode (consum 2μA):

$$P_{\text{standby}} = V \cdot I = 1.9V \cdot 2\mu A = 3.8\mu W$$

$$E_{\text{standby}} = P_{\text{standby}} \cdot t_{\text{standby}} = 3.8\mu W \cdot (3600 - 0.5) = 13.67mJ$$

- La quantitat d'energia total necessària per generar la ràfega sencera serà:

$$E_{\text{storage}} = E_{TX/RX(\min)} + E_{\text{standby}} = 18.05mJ + 13.67mJ = 31.72mJ$$

- Per tant, la potència total que el sistema de “harvesting” ha de lliurar és:

$$P_{in} = \frac{E_{\text{storage}}}{t_{\text{total}}} = \frac{31.72mJ}{3600s} = 8.8\mu W$$



El consum d'una bombeta de baix consum és de 22W !!!

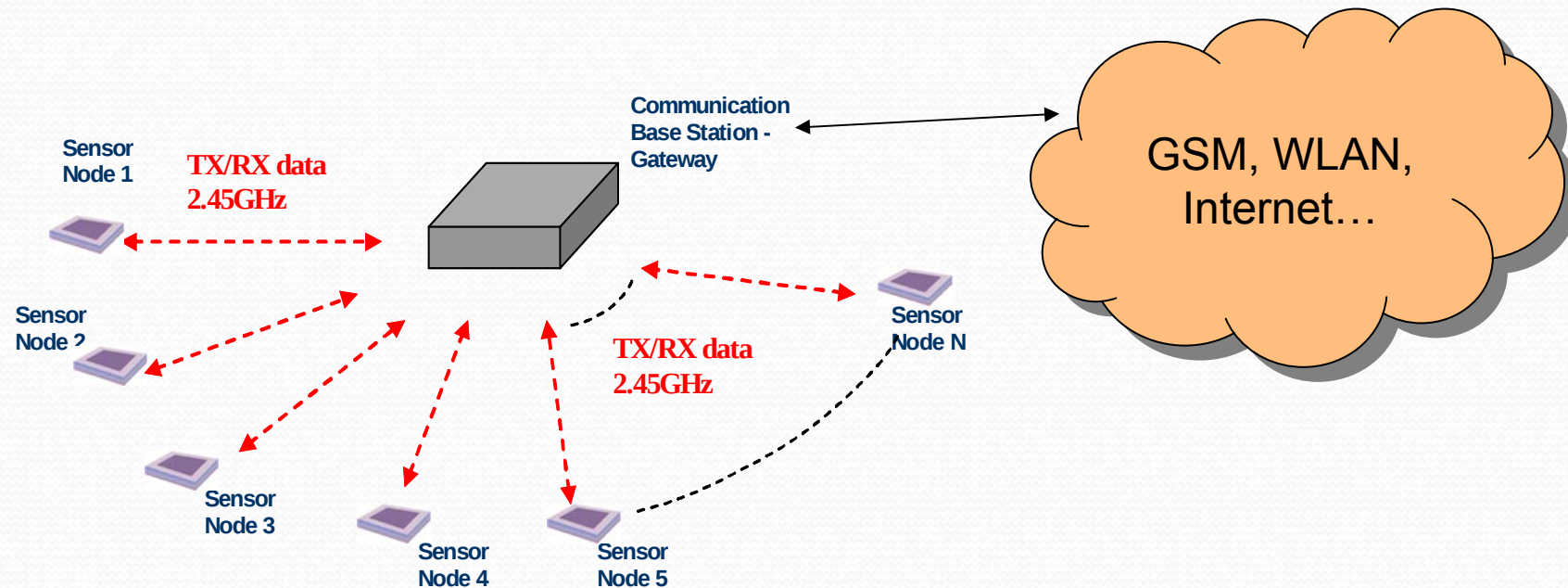
- ✓ És una potència molt baixa!
- ❖ Actualment la limitació està en la vida útil de les bateries.

Paràmetres de les xarxes de sensors wireless

- La transmissió de dades a temps real i la fiabilitat són paràmetres crítics de les xarxes wireless degut a errors de transmissió en el canal.
- Seguretat: confidencialitat i responsabilitat.
- Subministrament d'energia i baixa potència d'operació:
 - Transmissió d'energia via wireless
 - Mètodes de recol·lecta d'energia (energy-scavenging)
 - Bateries (vida útil 2-3 anys)

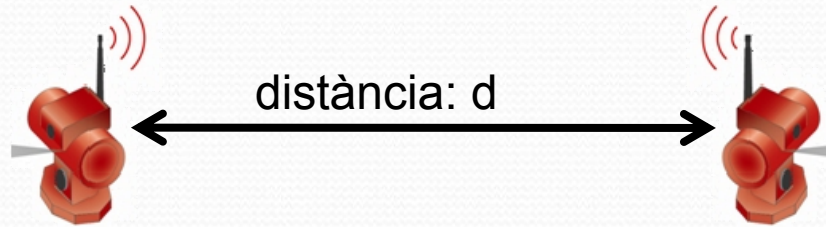
Xarxa de sensors wireless

- Cada node de sensors pot emmagatzemar, processar i transferir dades a altres nodes de sensors o al node central.
- La central es pot comunicar amb el món exterior utilitzant estàndards d'infraestructures de telecomunicacions com wireless LAN or xarxa de telefonia mòbil.



Problemes i solucions de les comunicacions a temps-real

- Problemes dels canals wireless i dels transceptors:
 - Pèrdues de camí (“Path Loss”): La intensitat del senyal radio disminueix amb la distància entre el transmissor i el receptor.

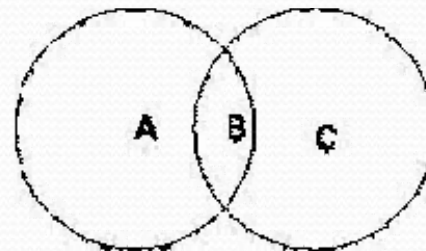


$$P_r(d) \sim |P_t(d_0 / d)^\gamma$$

d_0 : Distància de referència

γ : $\{2-6\}$ dependent de l'entorn

- Operació Half-Duplex dels transceptors: inhibeixen la transmissió i la recepció simultània.
- Capçaleres de dades amb preàmbul per assegurar la sincronització de les dades en canals sorollosos.
- Errors de canal degut a la propagació multicamí
- Terminals ocults



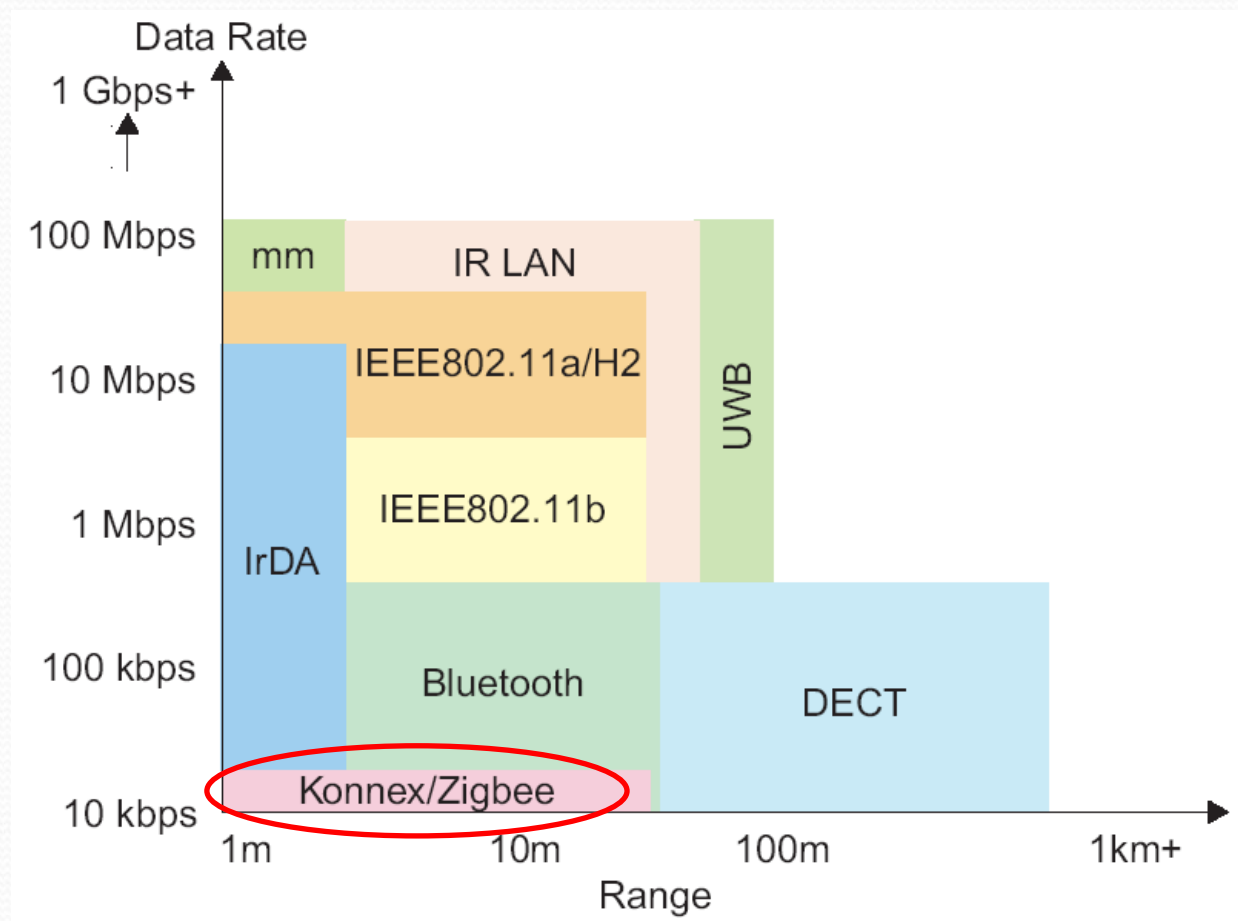
Node A is hidden from node C

Problemes i solucions de les comunicacions a temps-real

- Solucions pels errors degut al canal:
 - Utilització de modulacions robustes a les interferències de la propagació multicamí (OFDM, Spread Spectrum Modulation...).
 - Incorporació de redundància a la transmissió de dades: p.e. Transmetre un paquet múltiples vegades.
 - Optimització del nombre d'elements en la infraestructura (p.e. Punts d'accés.)
 - Utilització de la diversitat espacial: múltiples antenes en transmissió i en reflexió.
 - Sistemes de retransmissió i correcció d'error (ARQ).

Protocols de comunicació

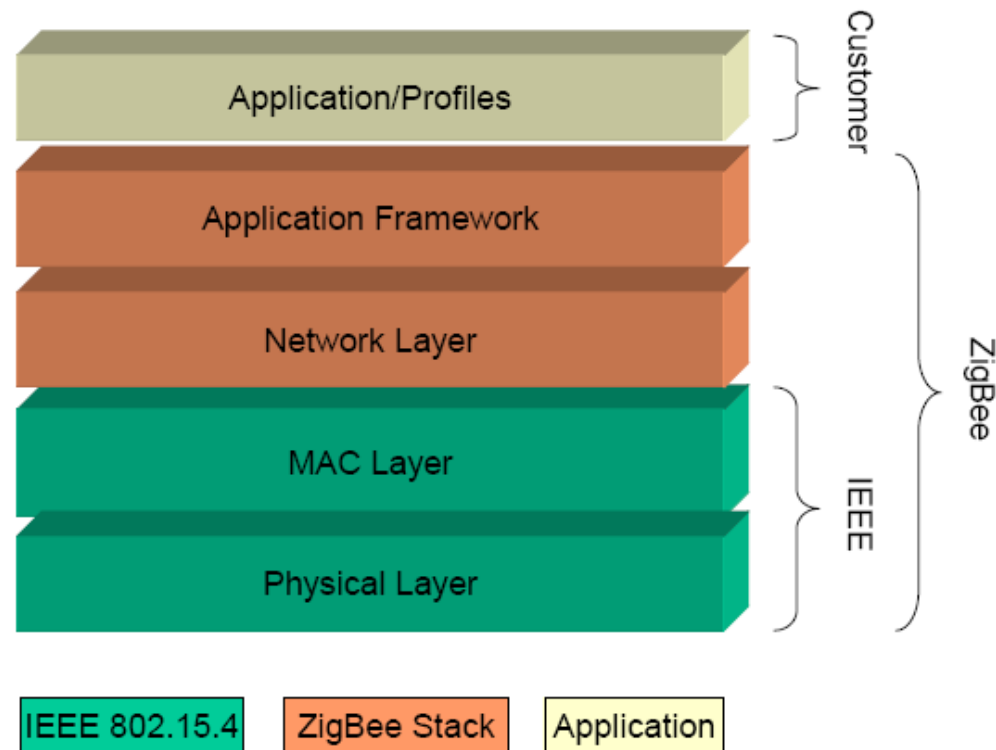
Short Range Wireless Radio Systems



Protocols de comunicació

Short Range Wireless Radio Systems

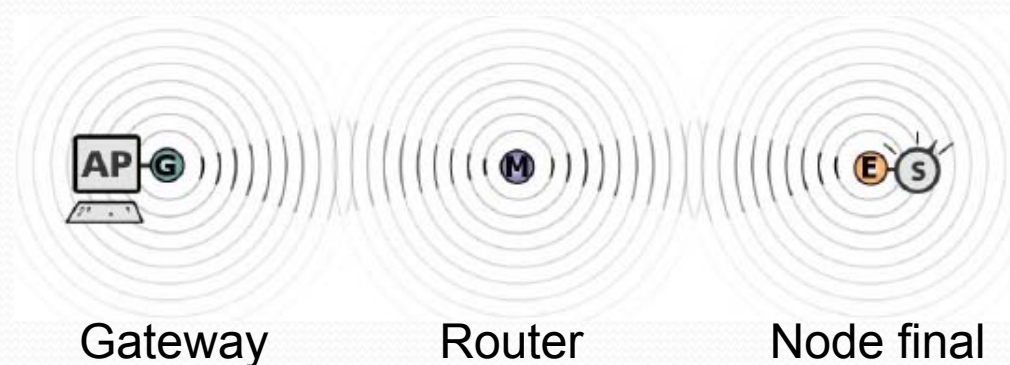
Protocol stack



Protocols de comunicació

Short Range Wireless Radio Systems

- Ruteo Dinámico.
- Bajo costo de Mantención.
- Baja latencia para aplicaciones críticas.
- Bajo consumo de Energía.
- Sistema Portable y flexible.
- Soporta varios tipos de topologías.
- Puede ser Infra-estructurada o ad-hoc.



Protocols de comunicació

Short Range Wireless Radio Systems

- IEEE 802.15.4 (estàndard que s'ha de complir)
 - Tasa de datos de 250 kb/s, 40 kb/s and 20 kb/s.
 - Operación en estrella y Peer to Peer.
 - Soporta Componente de baja Latencia.
 - Acceso a canales mediante CSMA-CA.
 - Soporta enrutamiento Dinámico.
 - Bajo consumo de Energía.
 - Operación de las Bandas de Frecuencias
 - 16 canales en la banda 2.4GHz ISM.
 - 10 canales en la banda 915MHz ISM. (A)
 - 1 canal en la banda 868MHz. (E)

Table 1—Frequency bands and data rates

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spreading parameters		Data parameters		
		Chip rate (kchip/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)	Symbol rate (ksymbol/s)	Symbols
868/915	868–868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902–928	600	BPSK	40	40	Binary
2450	2400–2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

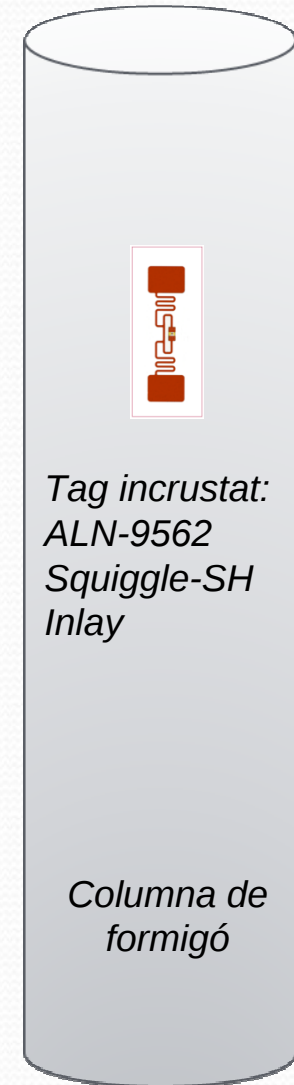
Protocols de comunicació

Short Range Wireless Radio Systems

- ZigBee (protocol de comunicació basat en IEEE 802.15.4)
 - 868 MHz (ISM) i 2.45 GHz (ISM)
 - Permet comunicació entre nodes (existeixen diferents topologies)
 - S'utilitza sempre per a transmissió de poques dades, però és suficient per una aplicació industrial (ex temperatura<1byte).

Etiquetes RFID

- Identificador per radiofreqüència: les microones permeten la comunicació amb l'etiqueta sense necessitat de visió directa.
- Depenent de la mida tindran més o menys abast:
 - Etiquetes petites: poc eficients, poc abans.
 - Etiquetes grans: més eficients, més abast, més consum.
- Tipus:
 - Passives: Barates, no necessiten bateria i només donen un identificador. Vida útil fins a 25 anys.
 - Actives: més cares i vida útil més curta (10 anys), però bon funcionament a prop de materials com l'aigua o el metall, més fiables que els passius, més abast (500m), possibilitat d'integrar sensors (pe. Temperatura, humitat, pH, llum, vibració...).
- Freqüència: 868 MHz i 2.45GHz
- Sensibilitat: -14dBm (depèn del tag)
- Quantitat d'informació. Capacitat del xip: 4-32Kbytes
- Capacitat de memòria per lectura i escriptura
- Preu: des de 20 cèntims (passius) fins a 90€ (actius amb sensors integrats)



*Tag incrustat:
ALN-9562
Squiggle-SH
Inlay*

*Columna de
formigó*

Etiquetes RFID (ex. d'aplicació)



RFID protege el World Trade Center 1

RFID ayuda a construir unos cimientos sólidos para la torre

Para la reconstrucción del lugar de los ataques terroristas del 11-8 en Nueva York, los ingenieros verterán toneladas de hormigón en los cimientos de cinco nuevos rascacielos.

Los constructores han encontrado una manera nueva e innovadora de supervisar el proceso de endurecimiento o curado del hormigón.

Están introduciendo etiquetas RFID activas con sensores de temperatura en el hormigón líquido. Los ingenieros pueden usar los datos de temperatura para calcular la dureza exacta del hormigón.

Los sensores de las etiquetas recopilan y almacenan los datos de temperatura y la señal activa de las etiquetas RFID se puede leer desde distancias de hasta 400 metros, incluso bajo seis metros de

hormigón.

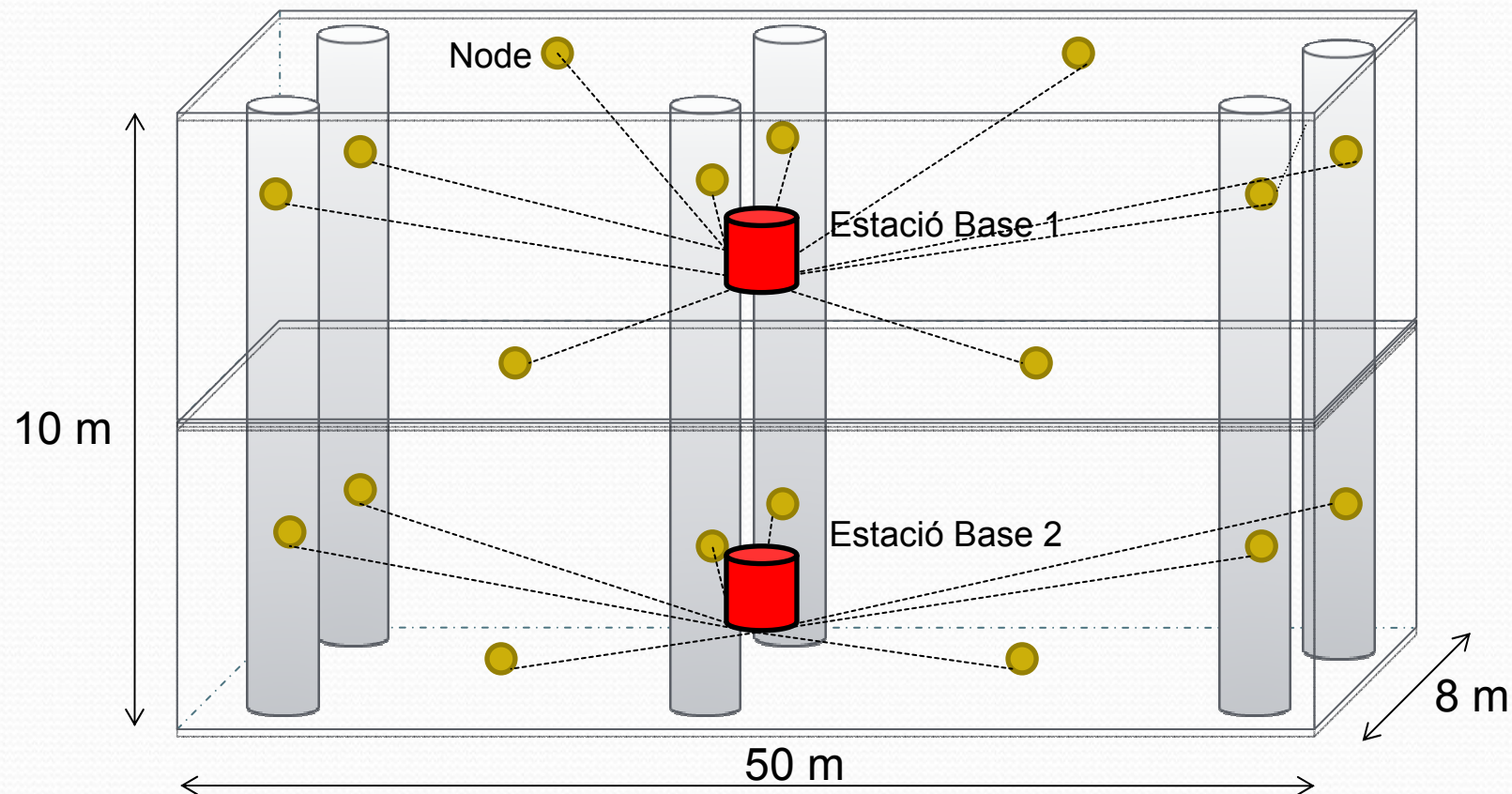
Mediante un lector de mano, los ingenieros pueden descargar los datos y analizarlos rápidamente antes de tomar la decisión de si continuar con la construcción.

Durante la construcción del World Trade Center 1 y los edificios del mismo complejo se usarán unas 20.000 etiquetas RFID.

Exemple d'Aplicació

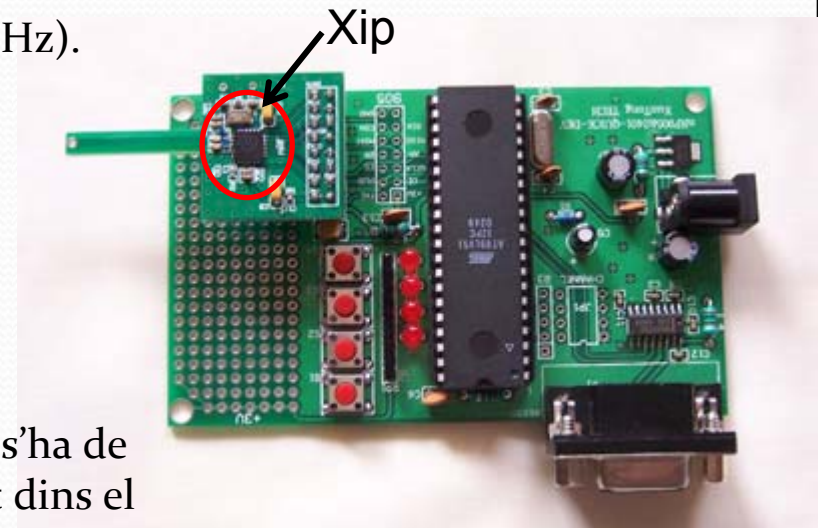
Xarxa de sensors wireless en un edifici industrial

Edifici de 2 plantes, una estació base per planta per a major cobertura



Xarxa de sensors wireless en un edifici industrial

- Protocol de comunicació ZigBee (802.15.4) (2.45 GHz).
- Edifici de dues plantes: 18 nodes.
- Cada node inclou varis sensors:
 - Temperatura, humitat, pressió, pH
 - Vibració, desplaçaments horitzontals
- Alimentació: emmagatzematge d'energia per "RF scavenging".
- Sensors superficials o incrustats. Si són incrustats s'ha de customitzar l'antena per al correcte funcionament dins el formigó.



QUICK REFERENCE DATA Node: Xip nRF24E1 Nordic Semiconductor

Parameter	Value	Unit
Minimum supply voltage	1.9	V
Maximum output power	0	dBm
Maximum data rate	1000	kbps
Supply current in transmit @ -5dBm output power	10.5	mA
Supply current in receive mode	18	mA
Temperature range	-40 to +85	°C
Sensitivity	-90	dBm
Supply current in Power Down mode	400	nA

Table 1 nRF2401 quick reference data

Xarxa de sensors wireless en un edifici industrial

- Càlcul de l'abast: distància màxima

$$P_{\text{rebuda(sensibilitat)}}(dBm) = P_{\text{transmesa}}(dBm) + G_{\text{TX}}(dB) + G_{\text{RX}}(dB) + 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi R_{\text{max}}} \right) + L_{\text{indoor}}(dB) + L_{\text{formigó}}(dB)$$

$$-90dBm = 0dBm + 2dB + 2dB + 6dB + 20dB + 20 \log \left(\frac{0.024}{4\pi R_{\text{max}}} \right) \rightarrow R_{\text{max}} = 25m$$

- Duració bateries: depèn del consum, aprox. fins a 5 anys
- Memòria necessària per emmagatzemar les dades:

- Dades fixes (especificacions): 64 bits

- Dades de mesura de 6 sensors:

$$6 \text{ sensors} \times 16 \text{ bits/captura} = 96 \text{ bits/captura}$$

- Lectura dels sensors un cop a la setmana:

$$24 \text{ captures al dia} \times 7 \text{ dies} = 168 \text{ captures}$$

- Espai total per a dades dels sensors d'una setmana:

$$96 \text{ bits/captura} \times 168 \text{ captures} = 16.128 \text{ bits}$$

- Memòria total requerida en el node:

$$64 \text{ bits (dades fixes)} + 16.128 \text{ bits (dades de mesura)} = 16.192 \text{ bits} \approx 2 \text{ Kbytes}$$

Necessitat de posar varies estacions base Depenent de les dimensions de l'edifici.

Xarxes de Sensors cap al monitoratge dels edificis

Lluís Jofre (jofre@tsc.upc.edu)

Gemma Roqueta (gemma.roqueta@tsc.upc.edu)



Departament de Teoria
del Senyal i Comunicacions



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Comissió de Construcció del Col·legi d'Enginyers
23 de Febrer de 2010