

# Universitat Oberta de Catalunya

## Màster Universitari en Enginyeria de Telecomunicació

**Treball Fi de Màster**

*L'Internet de les Coses:*

*arquitectures, protocols i aplicacions*

Estudiant: Mario Pareja Nieto

Consultor: Pere Tuset Peiró

**Gener 2015**

# Índex (I)

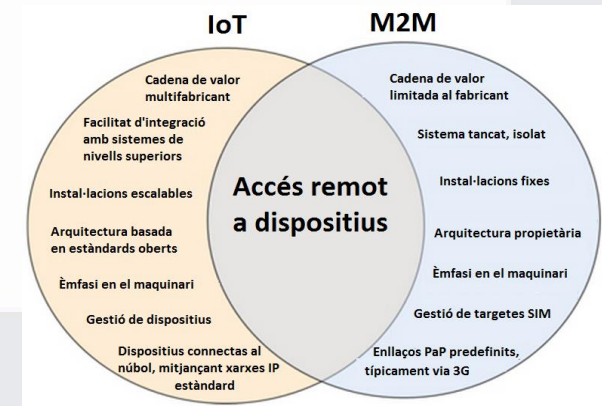
- **Paradigmes M2M/IoT. Diferències**
- **Àmbits d'aplicació de l'IoT**
- **Reptes de l'IoT**
- **Estàndards PHY/MAC per a WSNs**
- **Estàndards PHY/MAC: comparativa**
- **Estàndard IEEE 802.15.4e-2012**
- **Mecanismes DSME, TSCH, CSL i RIT**
- **Capa d'integració IPv6: 6LoWPAN**

# Índex (II)

- **Tipus d'encaminament en WSNs**
- **Encaminament IPv6 en LLNs: RPL**
- **Capa d'aplicació: CoAP**
- **Maquinari IoT**
- **Programari IoT**
- **Tendències actuals i futures**
- **Conclusions**

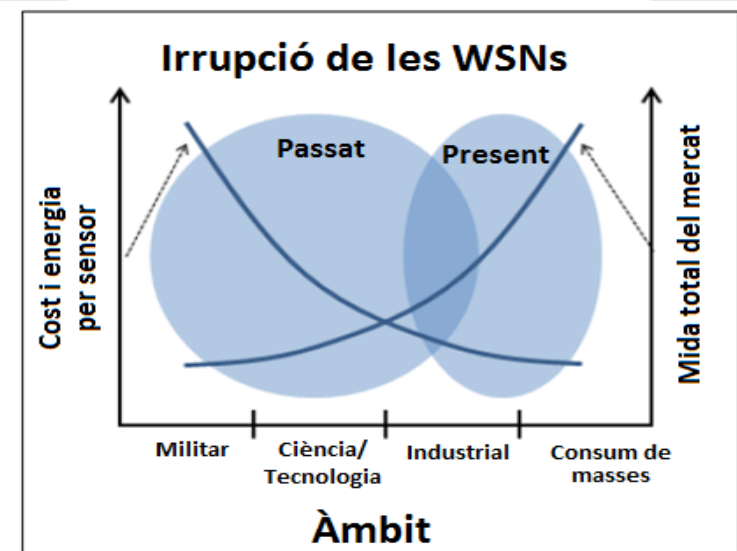
# Introducció. Paradigmes M2M/IoT

- **M2M (Machine-To-Machine)**: comunicació directa entre màquines (dos ordinadors de dos cotxes o V2V, dos *smartphones*, un PLC i un robot, etc.)
- **IoT (Internet of Things)**: va més enllà d'M2M. Nou paradigma de comunicació, pel qual qualsevol objecte, animal o persona (qualsevol "cosa") pot connectar-se amb altra "cosa", fent servir minúsculs nodes -motes- amb sensors, formant grans xarxes que es comuniquen entre sí. IoT és un concepte molt més ampli que M2M, que inclou aquest darrer.
- M2M acostuma a fer servir tecnologies propietàries, protocols tancats i xarxes privades. Cada fabricant utilitza els seus protocols. Manca d'interoperativitat.
- IoT ha de fer servir tecnologies i protocols oberts i la xarxa pública Internet. Les xarxes estan formades per motes de baix cost, molt baix consum i en entorns amb pèrdues (*Low Power and Lossy Networks*). Diferents xarxes han de poder comunicar-se entre sí fàcilment (garantir interoperativitat).



# Àmbits d'aplicació i usos de l'loT

- **Militar (MiOT – *Military Internet of Things*):** control d'armes; distribució física de tropes; monitoratge del camp de batalla; logística; *drones* amb sensors per monitoratge i execució d'accions, ...
- **Ciència i Tecnologia (salut i medi ambient):** frigorífics mèdics; monitoratge de la radiació UV; cura de l'esportista; *e-Health*; control de gasos tòxics, de terratrèmols i erupcions i del nivell de precipitacions; monitoratge dels hàbits de la fauna, ...
- **Industrial:** aplicacions genèriques M2M amb robots i PLCs; control de la qualitat de l'aire i presència d'ozó en una factoria; control de flotes; localització de paquets, ...
- **Agricultura i ramaderia:** monitoratge de la qualitat del sòl, control d'hivernacles, irrigació sel·lectiva, localització d'animals, control de descendència, ...
- **Serveis públics:** aparcament intel·ligent, mapa de sorolls urbà, nivells de camps EM, il·luminació intel·ligent, *Smart Grid*, congestió del trànsit, ...
- **Gran consum:** control del consum d'aigua/llum/gas, detecció d'intrusos, pagament de compres, control d'electrodomèstics, *wearables*, ...



# Reptes de l'loT

- **Desenvolupar un únic estàndard, obert, àmpliament acceptat, suportat i implementat pels fabricants de HW/SW, per a la creació de LLNs interoperables de manera senzilla.**
- **Manca d'adreces IPv4 per als bilions de dispositius que es poden connectar a la Xarxa (aconseguir que cada objecte quotidià tingui la seva pròpia adreça pública i unequivoca). Aconseguir una veritable 'Internet de les Coses', fent servir IPv6, en comptes d'un munt d'illes IPv4 aïllades ('Intranets of Things') que s'han de comunicar amb mecanismes NAT.**
- **Assegurar un grau de seguretat suficient en les comunicacions per a les dades sensibles, garantint la seva confidencialitat i integritat (fent servir mecanismes com WPA2, MACSec, AES 128, SALS i TLS).**
- **Assegurar fiabilitat en les comunicacions, en entorns grans, oberts, amb interferències i pèrdues, fent servir protocols d'aplicació com ara MQTT, CoAP, etc.**
- **Augmentar el màxim possible l'autonomia -vida de les bateries- dels nodes i que funcionin desatesos, fent que el *duty cycle* sigui el més baix possible (< 0.1%), disminuint la potència de la ràdio, minimitzant l'efecte de les interferències, etc.**

# Estàndards PHY/MAC per a WSNs

- IEEE 802.11ah – Low-Power WiFi
- IEEE 802.15.1 – Bluetooth 4.0 (Smart o LE)
- IEEE 802.15.4 – ZigBee
- IEEE 802.15.4 – WirelessHART (IEC 62591)
- IEEE 802.15.4 – ISA-100.11a (IEC 62734)
- EN13757-4:2012 - wM-Bus
- ISO/IEC 18000-7 – DASH7
- ITU T G.9959 – Z-Wave
- ANT/ANT+
- ETSI-EN-300 – DECT ULE
- ISO/IEC 14443 – RFID
- ISO/IEC 18092 – NFC
- Altres



# Estàndards PHY/MAC: comparativa

- BLE està més orientat a entorns domèstics (*wearables*, control d'*appliances*, connexió entre mòbils i auriculars, *smartphones*, *streaming* d'àudio, ...).
- Igualment, Low-Power WiFi està orientat a transferència de contingut multimèdia - àudio/vídeo- o bé per a dispositius de consum massiu (electrodomèstics, TVs, domòtica, *wearables*, ...)
- ZigBee era, fins ara, l'estàndard *de facto* per a WSNs però no és el més adient per a entorns industrials (amb interferències). Es necessita un node "coordinador" (mestre) que no pot dormir. Dos nodes qualssevol no poden parlar directament entre ells.
- wM-Bus és el més adient per al mesurament remot/lectura de subministres (comptadors de gas, electricitat, aigua, etc).
- ANT està molt estès per a la comunicació entre *gadgets* i vehicles esportius.
- WirelessHART és l'estàndard *de facto* per a control de processos industrials.
- DASH7 és l'estàndard en USA i l'EU per a defensa i entorns militars: llarg abast (2 Km), penetra bé en objectes i pluja, evita interferències dels 2.4 GHz, ...

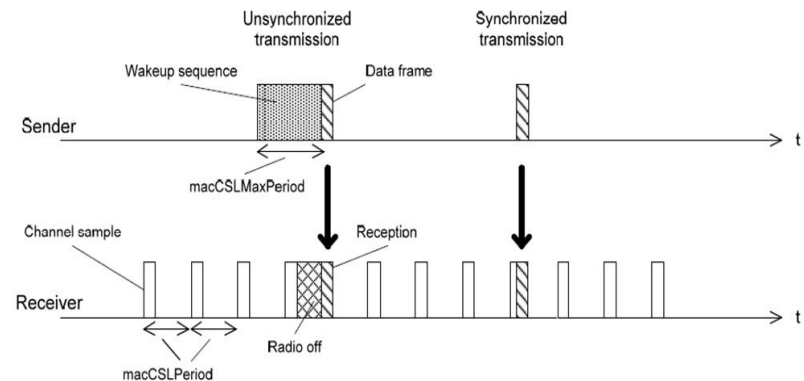


# Estàndard IEEE 802.15.4e-2012

- Revisió de l'IEEE 802.15.4 original i les versions 2006 i 2011.
- Ofereix millor suport per a mercats industrials.
- També permet compatibilitat amb WPANs xineses.
- Nova capa PHY i millores en subcapa MAC per suportar RFID bidireccional.
- Suport per a les bandes de 433 MHz i 915 MHz, a més de 2.4 GHz.
- Esmena a la capa PHY per facilitar apps de control de processos (p.ex. xarxes *Smart Grid*).
- Inclou possibilitat de salt de canal (*channel hopping*) que millora la robustesa contra interferències externes i disminueix el *multipath fading* (esvaniment multicamí).
- S'inclou l'opció de ranures de temps variables (*variable slot time*).

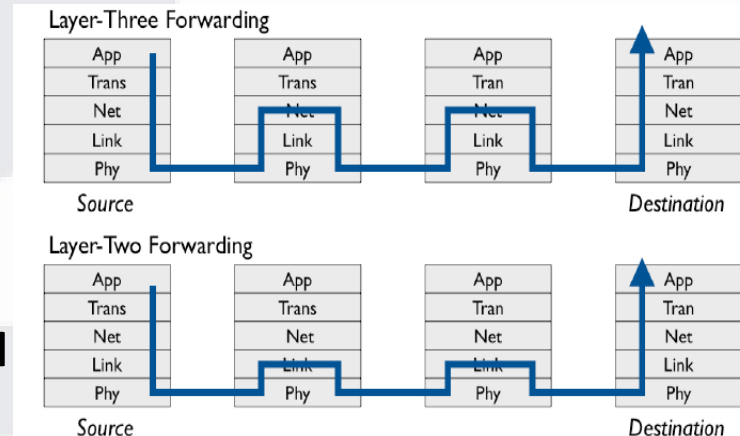
# Mecanismes DSME, TSCH, CSL i RIT

- L'IEEE 802.15.4e proporciona els següents nous mecanismes/funcionalitats:
  - **DSME (Deterministic & Synchronous Multichannel Extension)**: proporciona suport per aplicacions industrials i comercials que necessitin latència determinista i fiabilitat d'enllaç molt alta.
  - **TSCH (Time-Slotted Channel Hopping)**: tècnica d'accés al medi basada en tenir els nodes sincronitzats temporalment entre ells i permet el canvi de freqüència d'operació -canal- per minimitzar interferències i augmentar fiabilitat.
  - **CSL (Coordinated Sampled Listening)**: permet als dispositius receptors mostrejar periòdicament el canal per comprovar si hi ha transmissions entrants. Bon compromís latència/energia utilitzada.
  - **RIT (Receiver Initiated Transmission)**: alternativa *Low Energy* a CSL quan no es fan servir balises. Permet a un node demanar dades als dispositius veïns. Sols es pot fer servir en *Full-Function Devices*.



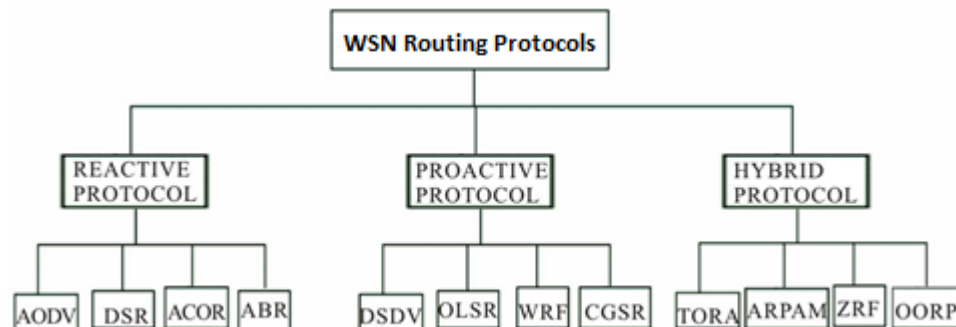
# Capa d'integració IPv6: 6LoWPAN

- Capa d'adaptació que defineix mecanismes d'encapsulació i “compressió” de capçaleres per permetre que paquets IPv6 puguin ser enviats i rebuts en xarxes basades en l'IEEE 802.15.4.
- A més de la compressió, també s'encarrega de la fragmentació de datagrames IPv6 en múltiples trames de capa enllaç, per poder acomodar l'MTU de 802.15.4 (127 bytes max).
- Les especificacions venen definides en els RFC6282 i RFC6775.
- Problema: si hi ha massa fragmentació, el rendiment disminueix dràsticament (augmenta probabilitat d'haver de reenviar un paquet).
- Permet reenviament tant a nivell de capa d'enllaç (*Mesh-Under*) com a nivell de capa de xarxa (*Route-Over*).



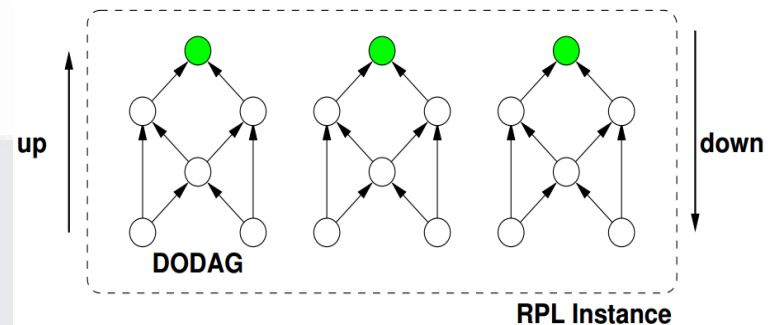
# Tipus d'encaminament en WSNs

- **Encaminament reactiu (sota demanda):** es descobreixen rutes entre node origen i destinació únicament quan cal. Redueix la sobrecàrrega de tràfic deguda a missatges de control, a costa d'una major latència en descobrir rutes. Les taules de *routing* són més petites. Alta escalabilitat. Exemples: AODV, DSR, ABR, DYMO, ACOR, LOAD.
- **Encaminament proactiu (*table-driven*):** basat en actualitzacions periòdiques de taules de rutes, tant si aquestes darreres es necessiten com si no. Les taules són més grans. Més *overhead* degut a la transmissió de les taules (major BW necessari). Menor latència fins enviar dades. Baixa escalabilitat. Exemples: OSRL, CGSR, WRP, MultihopLQI, HybridLQI, CTP, RPL.
- **Encaminament híbrid:** balanceig entre els avantatges dels  *routings*  reactiu i proactiu. Escalabilitat mitjana. Exemples: ZRP, TORA.



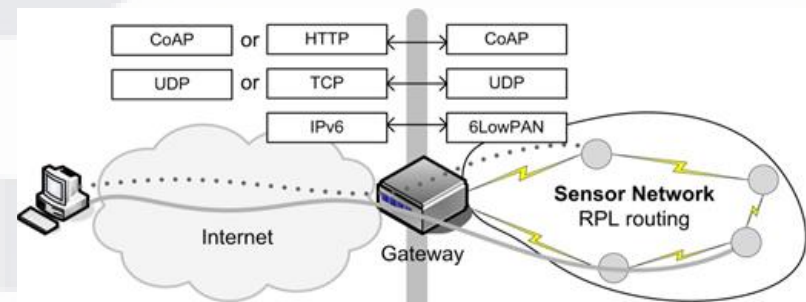
# Encaminament IPv6 en LLNs: RPL

- RPL (*'Ripple'*): protocol d'encaminament proactiu per a LLNs que fan servir IPv6. Creat pel grup ROLL (*Routing Over Low Power and Lossy Networks*) de l'IETF. Opera en la capa IP (nivell 3 OSI).
- És un protocol Vector-Distància, que especifica com construir un graf acíclic dirigit orientat a destinació (DODAG) amb una funció objectiu i un conjunt de mètriques i restriccions, per tal de trobar el millor camí.
- Suporta comunicació P2P (punt a punt) i M2PL (punt a multipunt).
- Permet modes *Storing* (nodes intermitjos emmagatzemen taules de *routing*) i *Non-Storing* (nodes intermitjos no guarden cap taula de rutes)
- Es poden crear múltiples instàncies RPL, formada cadascuna per un o varis DODAGs. El tràfic pot anar "cap amunt" (arrel) o "cap avall" (fulles), segons calgui.



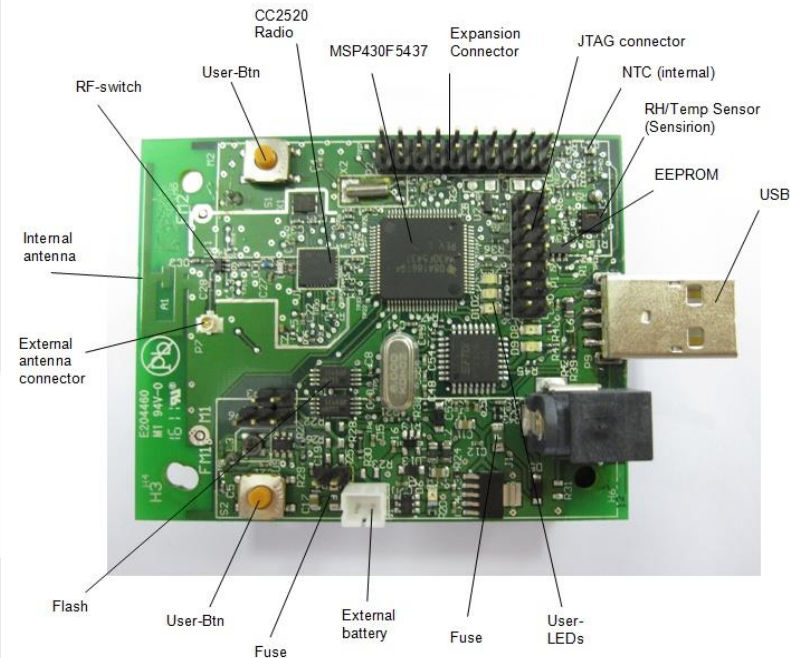
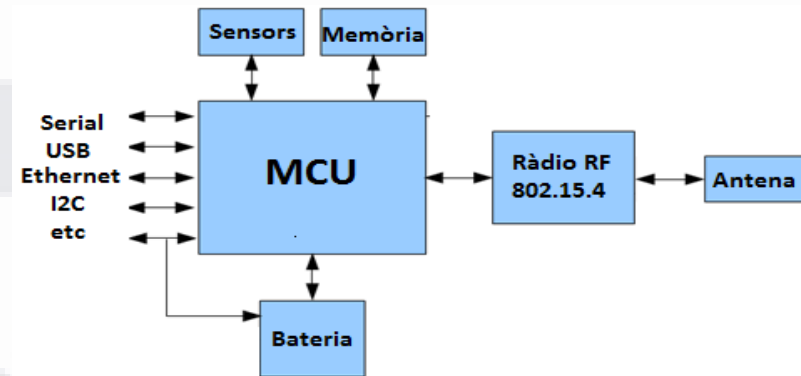
# Capa d'aplicació: CoAP

- **CoAP (*Constrained Application Protocol*):** protocol de la capa d'aplicació, definit a l'**RFC7252**, orientat a serveis, basat en transferència de documents.
- Bàsicament, es tracta d'una "simplificació" del protocol HTTP, amb menys mètodes/verbs.
- Dissenyat tenint en compte les restriccions de consum, processament i memòria dels nodes d'una LLN. Està dirigit a aplicacions M2M/IoT.
- Suporta *multicast*, té *overhead* molt baix i és un protocol molt simple.
- Utilitza model semblant a client/servidor. Fa servir els mètodes **GET**, **PUSH**, **POST** i **DELETE**, com HTTP. Segueix l'arquitectura **REST (*Representational State Transfer*)**.
- Fa servir el port **80/UDP** (travessa fàcilment els tallafocs entre xarxes).
- Altres protocols d'aplicació per a IoT són **MQTT-NS**, **AMQP** i **XMPP** que, pel contrari, estan orientats a missatges i segueixen un model publicació/subscripció, amb un *broker*.



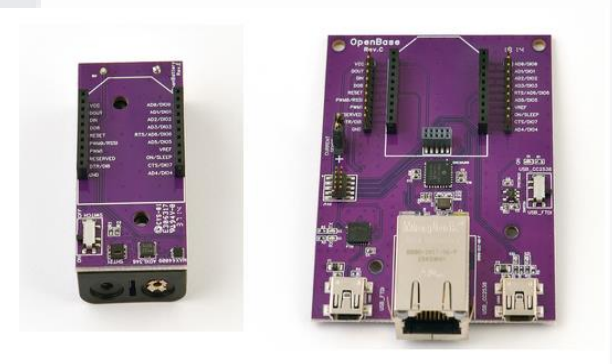
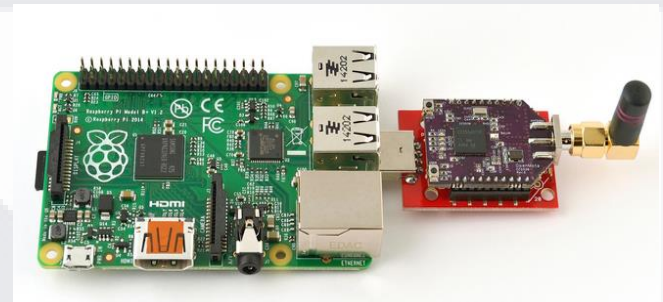
# Maquinari IoT

- Els nodes d'una LLN es poden basar des d'en senzills MCUs de 8 bits (Atmel ATmega1280) fins a potents processadors de 32 bits (ARM Cortex-M3).
- L'MCU, juntament amb una sèrie de memòries (RAM, Flash, ROM), una ràdio RF (per exemple IEEE 802.15.4 o BLE), una antena, un o varis sensors, un conjunt d'interfícies de comunicació (Serial, USB, I2C, etc.) i una bateria, conformen una plataforma de desenvolupament o "mota".
- Algunes plataformes conegudes per a IoT són: Intel Edison, TinyDuino (Arduino), BeagleBone Black, Libelium Waspote, TelosB, GINA, OpenMote.



# Exemple maquinari IoT: OpenMote

- Plataforma basada en el SoC (*System on a Chip*) TI CC2538, amb MCU ARM Cortex-M3 32 bit a 33 MHz, transceptor RF TI CC2520 (IEEE 802.15.4), 32 KB RAM i 512 KB Flash.
- Té un *form factor* que compleix amb Xbee (permet comunicar-se amb una computadora fent servir una motxilla USB del tipus *Xbee Explorer Dongle*).
- Pot funcionar tant com a *End-Device* o com a *Gateway* amb una xarxa exterior (fent servir la placa adicional OpenBase i el seu port FE).
- Està provada amb els sistemes operatius OpenWSN, Contiki, FreeRTOS i RIOT.
- Preu unitari d'uns 90 EUR.





# Programari IoT

- Idealment, es busca que els SOs per a maquinari IoT incorporin suport per a IEEE 802.15.4, incloent 802.15.4e, així com els protocols i mecanismes relacionats (TSCH, 6LoWPAN, RPL, CoAP, MQTT-SN, etc).
- També es pretén que l'SO ocupi la menor quantitat de memòria possible (el *code footprint* d'alguns és de tant sols 400 byte, p. ex. TinyOS).
- Alguns d'ells són *multi-fil* i en temps real (p. ex. FreeRTOS i RIOT).
- Els SOs més utilitzats són: OpenWSN, Contiki, FreeRTOS, RIOT i TinyOS.

SO	Footprint (core)	Multi-thread	Temps real	6LowPAN	TCP	Modularitat
OpenWSN	30 KB Flash 3.5 KB RAM	No	No	Sí	Sí	Sí (parcial)
Contiki	10 KB RAM 30 KB ROM	Sí (parcial)	Sí (parcial)	Sí	Sí	Sí
FreeRTOS	6-10 KB ROM	No	Sí	Sí	Sí	
RIOT	1.5 KB RAM 5 KB ROM	Sí	Sí	Sí	Sí (experimental)	Sí
TinyOS	400 bytes RAM	Sí (complet)	No	Sí	Sí (experimental)	No

# Exemple programari IoT: OpenWSN

- En realitat no és un SO sinó una implementació de *open source* d'una pila de protocols completa, basada en IPv6/6LoWPAN i IEEE 802.15.4e a nivell MAC, destinada a la creació de LLNs.
- La mida del codi *-footprint-* de la pila completa és de tant sols 30 KB en memòria Flash i d'uns 3.5 KB en RAM.
- Implementa els següents protocols de l'IoT a cada nivell:
  - Aplicació: CoAP i HTTP
  - Transport: TCP i UDP
  - Xarxa i encaminament: IETF RPL
  - Capa d'adaptació: IETF 6LoWPAN
  - Accés al medi (MAC): IEEE 802.15.4e
  - Capa física (PHY): IEEE 802.15.4-2006
- Ara per ara, és l'únic SO que implementa el mecanisme TSCH de 802.15.4e.



# Tendències actuals i futures

- Actualment, les investigacions es centren en disminuir encara més el cicle de treball dels nodes, amb tècniques com p.ex. A-TSCH (canvi de canal amb sincronització adaptativa) que permet reduir fins a un 83% el nombre de resincronitzacions periòdiques entre nodes i, per tant, reduir encara més el *duty cycle*. D'aquesta manera, s'allarga més la vida de les bateries.
- Altra tècnica per augmentar l'autonomia de les motes passarà per la recol·lecció d'energia, bé de fonts d'energia regulars i predictibles (*energy harvesting*) com de fonts irregulars (*energy scavenging*), amb un mòdul adicional (p.ex. placa solar) que recull energia de l'exterior i l'emmagatzema.
- També es continua treballant en la progressiva miniaturització de les motes i la utilització de materials que permetin abaratir el costos de fabricació.
- A nivell comercial, la tendència és anar cap a un escenari on els proveïdors oferiran 'IoT as a Service' (IoTaaS), on s'oferiran serveis de valor afegit basats en IoT (p.ex. objectes intel·ligents com a servei, on es paga per ús).

# Conclusions (I)

- IoT transcendeix de M2M i derivats (per exemple V2V). Busca comunicar xarxes de “coses” entre elles, fent servir Internet i nodes de molt baix consum/cost.
- Els àmbits d’aplicació de l’IoT són immensos: militar, industrial, llar, salut, *Smart Cities*, ...
- Actualment hi ha bastants tecnologies/estàndards per a WSNs i LLNs, cadascuna amb els seus ‘pros i contres’: ZigBee, Bluetooth LE, Low-Power WiFi, DASH7, WirelessHART, ANT, Z-Wave, etc. Escollir una tecnologia, HW o SW concrets dependrà de les necessitats del problema a resoldre.
- 802.15.4e es posiciona com nou estàndard *de facto* per a LLNs. És una evolució de l’especificació original i està preparat per a entorns industrials i amb interferències, gràcies a mecanismes com TSCH, CSL i RIT (alguns d’ells també presents en protocols com BLE o WirelessHART).
- IPv6 és imprescindible per poder parlar seriosament d’IoT (cada node amb una adreça pública única). 6LoWPAN fa possible l’ús d’IPv6 en LLNs. Es pot combinar amb protocols de capa superior com ara LOADng o RPL (*routing*) i MQTT-SN o CoAP (aplicació).
- S’ha d’aconseguir que els nodes consumeixin encara menys (bateries +10 anys), mitjançant la disminució del *duty cycle*, reducció de potència de la ràdio, sincronització dels nodes, etc.
- El nombre d’àmbits d’aplicació i usos de l’IoT és cada dia més gran i s’integra amb el *Cloud*.

# Conclusions (II)

- **A nivell personal, aquest Treball ha servit a l'estudiant per aprendre i formar-se en un tema completament desconegut però al mateix temps de plena actualitat, gairebé emergent i en contínua expansió.**
- **El Treball ha permès assolir unes bases teòriques que obren la porta a l'estudiant, en un possible futur, a continuar aprofundint amb estudis d'investigació/Doctorat en el camp de les LLNs.**
- **La demanda de professionals amb coneixements i experiència en tecnologies IoT és cada cop més gran, per la qual cosa aquest Treball ha permès a l'estudiant obrir noves possibilitats/portes a nivell laboral.**
- **El TFM ha permès a l'estudiant, en línies generals, obtenir una major comprensió de les actuals tecnologies i protocols de xarxes sense fils, la feina d'estandarització d'organismes com l'IEEE o l'IETF i les tendències actuals i futures en el camp de les aplicacions M2M/IoT.**