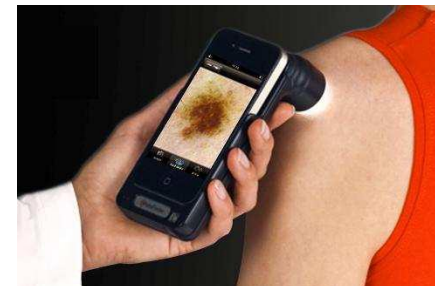
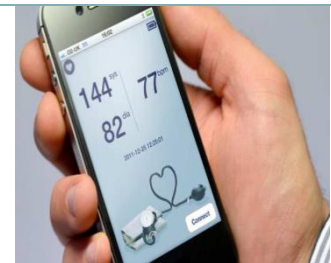


Protocolli di interoperabilità per IoMT

Exposanità 2026
23 aprile 2026

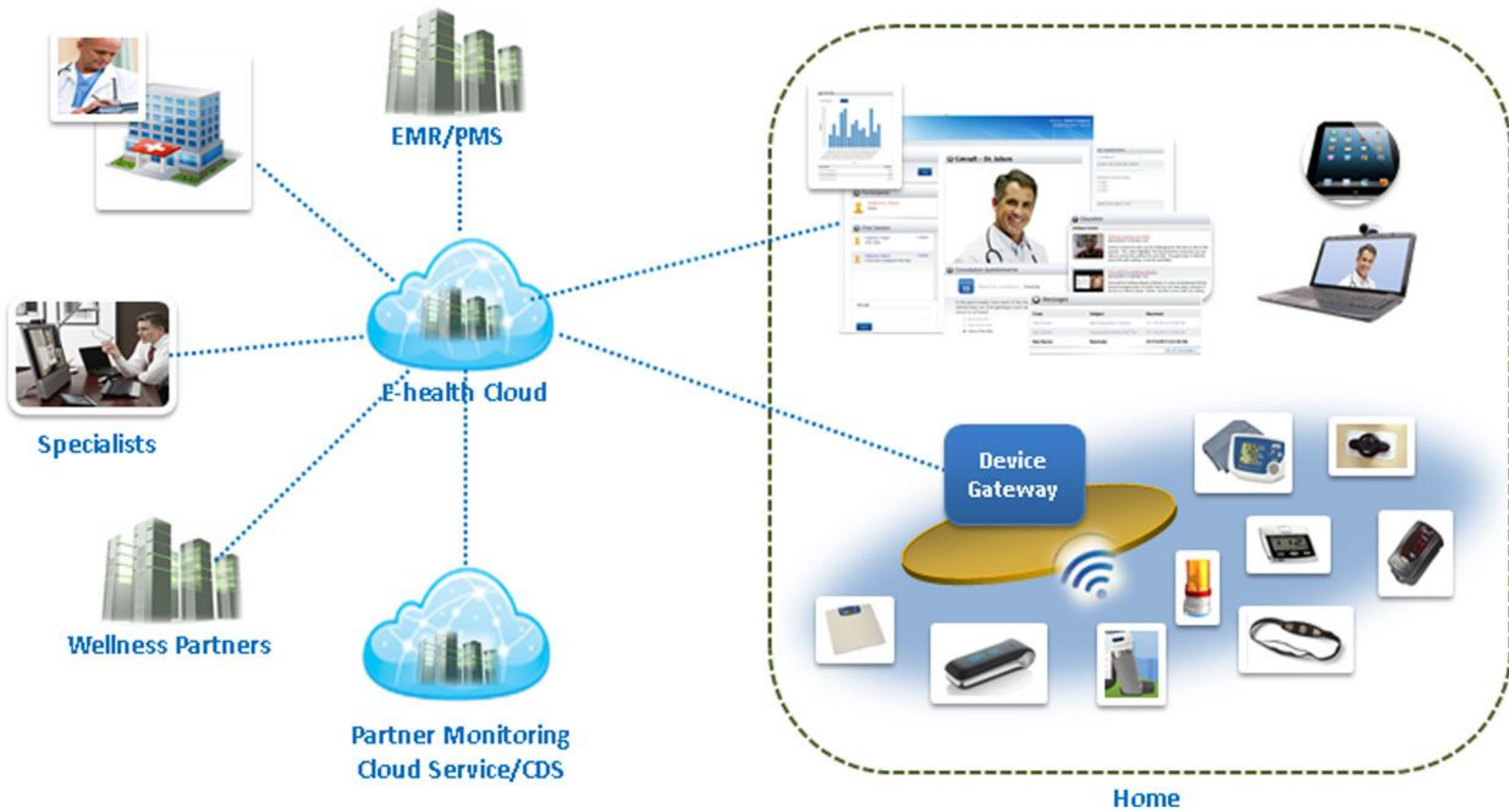
Andrea Capra



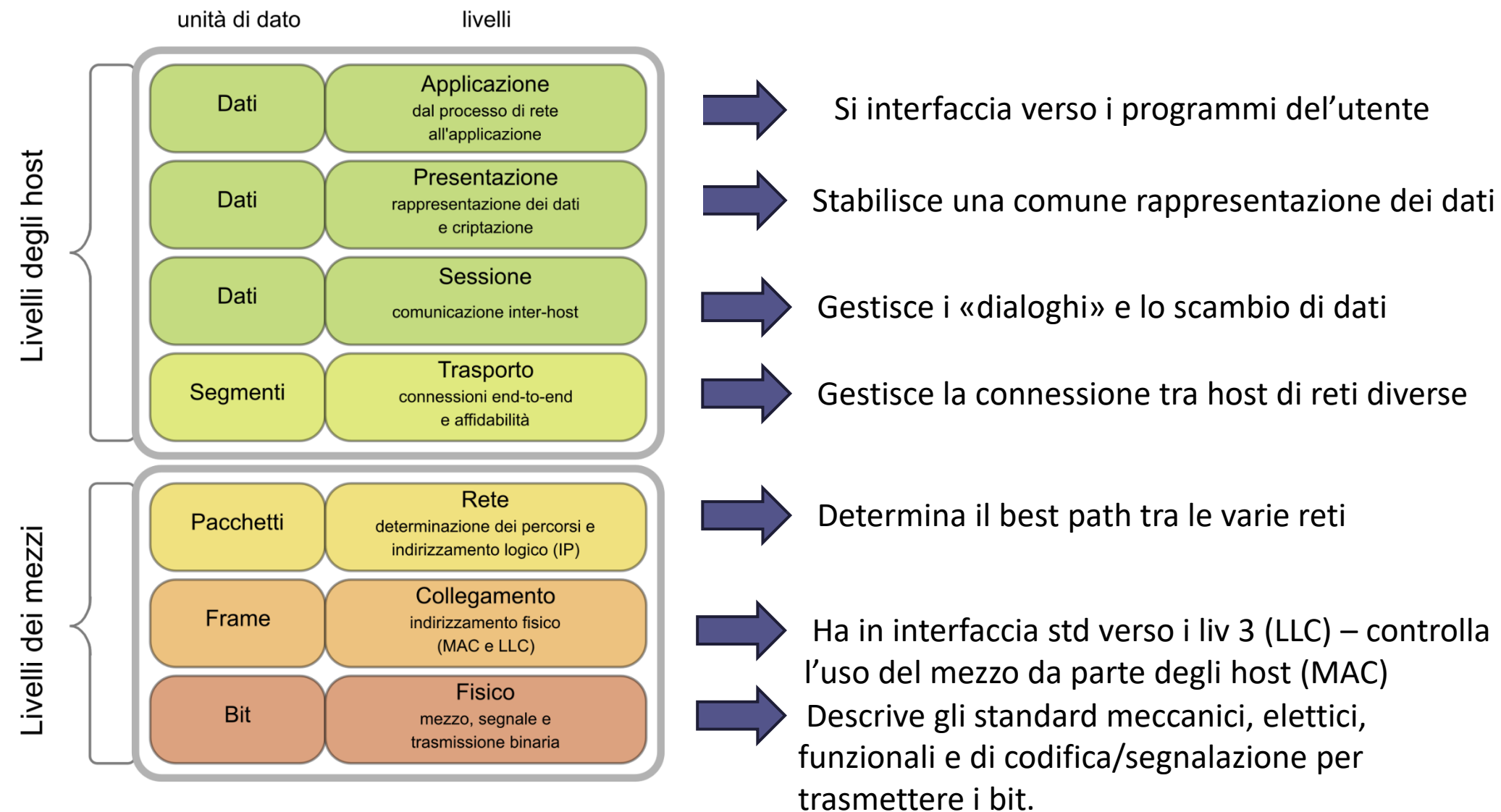
Internet of Medical Things (IoMT)

- **Definizione di Internet of Medical Things (IoMT)**
- **Concetto di Base:**
 - L'IoMT rappresenta l'integrazione di dispositivi medici, sensori, software e sistemi di gestione dati attraverso la connessione Internet, creando un ecosistema interconnesso nel settore sanitario.
- **Tecnologie Chiave:**
 - **Sensori Biometrici:** Monitoraggio di parametri vitali come la pressione sanguigna e la frequenza cardiaca.
 - **Dispositivi Indossabili:** Smartwatch, patch e altri dispositivi per la raccolta dati in tempo reale.
 - **Piattaforme Cloud:** Archiviazione sicura e accesso ai dati da qualsiasi luogo.
 - **Intelligenza Artificiale:** Analisi avanzata dei dati per diagnosticare, prevenire e personalizzare le cure (AIoMT).
- **Interoperabilità:**
 - È necessario che gli strumenti possano dialogare con altri strumenti o servizi: per questo motivo è importante lavorare su piattaforme aperte, basate su standard aperti.
- **Sicurezza:**
 - Il numero dei dispositivi medici connessi e le loro crescenti funzionalità presentano rischi aggiuntivi per la sicurezza dei dati.
 - IoMT ha reso obsolete il tradizionale concetto di sicurezza perimetrale.
 - I dispositivi IoMT, una volta introdotti all'interno del perimetro di sicurezza di una rete, sono implicitamente autorizzati ad accedere la rete e ai dati in essa condivisi

Architetture per IoMT

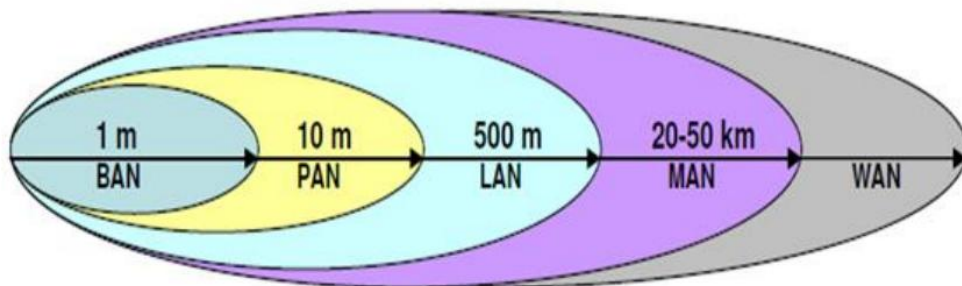
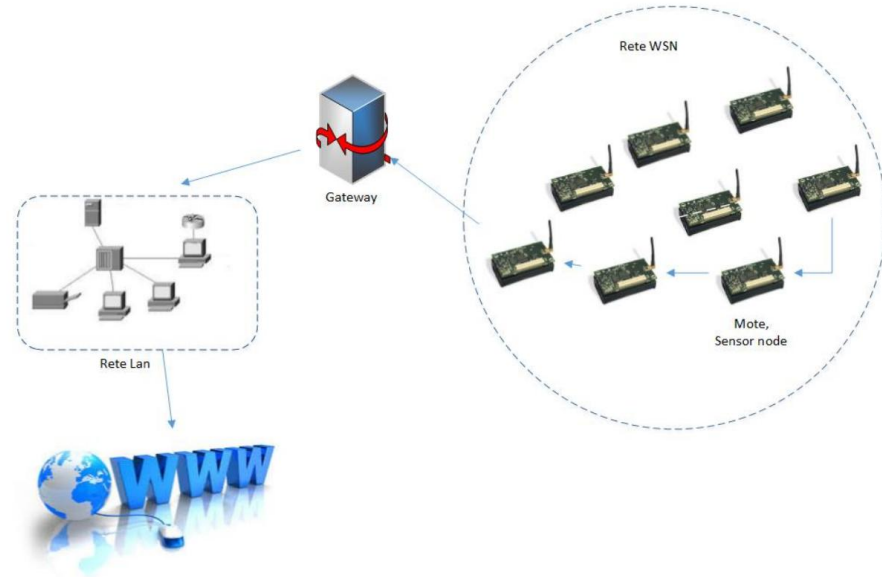


Il modello ISO/OSI



Cosa è una wireless sensor network (WSN)?

- Wireless Sensor Network (o WSN) indica una tipologia di rete avente architettura distribuita, realizzata con un insieme di sensori (detti mote o sensor node) wireless interconnessi caratterizzati da poca RAM ed una CPU con modeste prestazioni e consumi energetici contenuti.
- I nodi wireless sono collocati nell'area in cui c'è un evento da osservare; essi inviano i dati periodicamente rilevati ad un punto di raccolta, detto base station, gateway o coordinatore, il quale gestisce la rete stessa ed inoltra i dati ad un altro sistema remoto per ulteriori elaborazioni.
- Le WSN sono reti collaborative intelligenti, concepite per auto-organizzarsi, in grado di reagire in modo autonomo ad eventi critici e a cambiamenti topologici.
- Per tale flessibilità offrono una vasta gamma di utilizzi
- Una Body sensor network è una WSN costituita da sensori disposti sul corpo di un essere vivente.



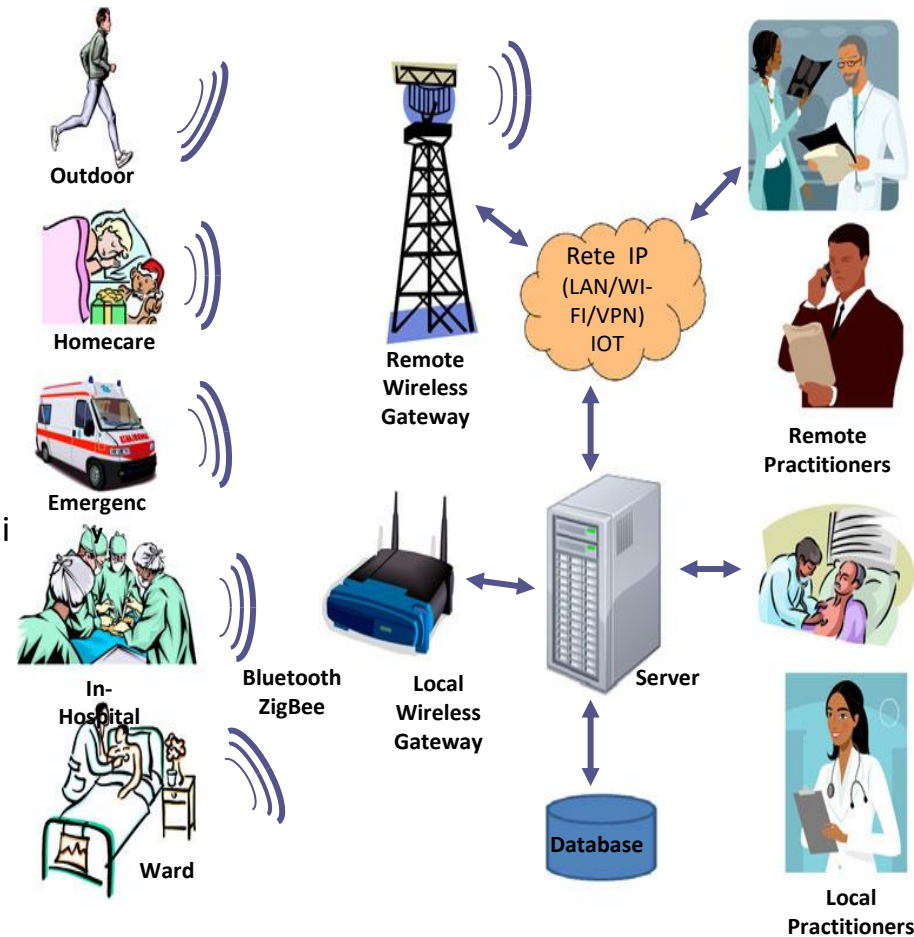
Per rispettare tutti i requisiti tecnici, energetici e di fault tolerance, era necessario l'utilizzo di architetture e protocolli di rete specifici: per questo sono state sviluppate le reti LoWPAN, un caso particolare delle reti PAN.

Nell'ambito delle reti PAN (Personal Area Network) il comitato che si dedica allo studio delle WPAN (Wireless Personal Area Network) ha definito il protocollo IEEE 802.15 nel quale sono definite tre distinte classi di WPAN che si differenziano per data rate, consumi e QoS.

- **IEEE 802.15.3** - elevati data rate, elevati QoS (applicazioni multimediali come WiMedia e Bluetooth2);
- **IEEE 802.15.1** – medio data rate (per sostituzione cavi per elettronica di consumo – es. Bluetooth).
- **IEEE 802.15.4** – basso data rate (esigenze di bassi consumi e bassi costi).

Interoperabilità nelle WSN

- **IEEE 802.15.4:** Definisce gli standard per il livello fisico (PHY) e il controllo di accesso al mezzo (MAC) per reti WPAN a bassa velocità, costituendo la base su cui operano protocolli come ZigBee, 6LoWPAN e Thread.
- **ZigBee:** Uno standard di rete mesh basato su IEEE 802.15.4, largamente utilizzato per applicazioni industriali e domestiche grazie alla sua affidabilità e basso consumo energetico.
- **6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks):** È lo standard chiave (RFC 4919, 4944) per l'interoperabilità, poiché permette di utilizzare il protocollo IPv6 su reti a bassa potenza e limitate risorse come IEEE 802.15.4. Consente ai sensori di avere un indirizzo IP, rendendoli direttamente accessibili tramite Internet.
- **RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks):** È un protocollo di routing progettato appositamente per le WSN che supporta topologie mesh e garantisce interoperabilità a livello di rete.
- **CoAP (Constrained Application Protocol):** Un protocollo a livello applicativo, simile a HTTP ma molto più leggero, ottimizzato per dispositivi con vincoli di memoria e potenza, facilitando l'interoperabilità nel contesto IoT.



L'interoperabilità nelle WSN deve affrontare diverse sfide legate alla natura stessa di queste reti, che sono spesso caratterizzate da alta densità, topologie dinamiche e vincoli energetici. I protocolli devono inoltre gestire la frammentazione dei messaggi e garantire l'integrazione con sistemi preesistenti (gateway). L'adozione di sistemi operativi certificati (es. Contiki) che implementano 6LoWPAN è cruciale in questo ambito

Livelli 1 e 2 - IEEE 802.15.4

- Data rates of 250 kb/s, 100kb/s, 40 kb/s, and 20 kb/s
- Operazione in tipologia di rete a stella, peer-to-peer o cluster-tree
- Indirizzi in forma breve a 16bit o 64bit in forma estesa (indirizzi allocati 2^{16} = 65.536 nodi)
- Accesso al canale in modalità CSMA-CA (carrier sense multiple access with collision avoidance)
- Trasferimento affidabile dei dati tramite ack (acknowledged protocol)
- Basso consumo energetico
- Opera nelle seguenti bande di frequenza:
 - 16 canali nella banda 2.4 GHz
 - 10 canali nella banda 915 MHz
 - 1 canale nella banda 868 MHz.

Livello 1 Fisico: si occupa da un lato di interfacciarsi con il mezzo di trasmissione fisico, il transceiver, dall'altro dello scambio dei dati con il livello superiore (livello MAC).

Funzioni svolte:

- Modulare/de-modulare i bit
- Sincronizzare i pacchetti
- Trasmettere/Ricevere dati dal livello Mac
- Implementare i meccanismi che permettono il controllo della radio

Livello 2 Data Link : è il livello in cui vengono definiti gli standard dell'architettura di rete.

Funzioni svolte:

- Associare/dissociare i dispositivi con la rete
- Fornire controllo d'accesso ai canali di comunicazione
- Generare dei Beacon
- Verificare gli errori
- Controllare e sincronizzare i dati

Il protocollo è in grado di implementare tre modalità di sicurezza:

1. Modalità Unsecured
2. Modalità ACL (Access Control List)
3. Modalità Secured Associare/dissociare i dispositivi

Livello3 ZigBee

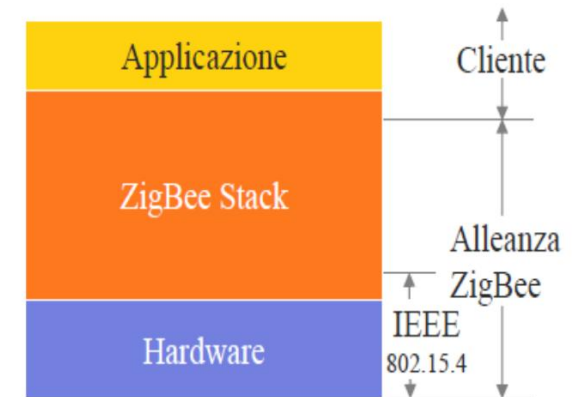


- 1998 Motorola inizia a studiare questo protocollo
- 2002 fondata la ZigBee Alliance (400 aziende tra cui Motorola, Philips, Samsung, Mitsubishi, Texas Instruments) con lo scopo di implementare uno standard in grado di realizzare reti stabili caratterizzate da un basso consumo e di estrema facilità d'uso, anche a costo di un bit rate relativamente basso.
- 2005 Rilasciata la specifica 1.0

Lo stack ZigBee è un'aggiunta allo standard IEEE 802.15.4 e serve ad interfacciare i livelli di rete più bassi (Fisco e collgamento) con il livello più alto, ovvero il livello applicazione e di sicurezza

Caratteristiche:

- Opera su frequenze libere (banda UHF, 868 o 915 MHz) e ISM (2,4 GHz), con velocità di trasmissione dati comprese tra 20kbit/s e 250kbit/s.
- Garantisce l'interoperabilità fra i prodotti di diversi costruttori.
- Ha raggio di azione non superiore a 10m su singola tratta (single-hop), essendo una tecnologia di prossimità. Tuttavia la copertura può essere estesa a chilometri in modalità multi-hop.
- Possiede caratteristiche di adattabilità, flessibilità in cui i nodi si auto-configurano, cioè si uniscono ad una rete e coprono in maniera automatica il loro ruolo all'interno della rete stessa.
- Supporta un gran numero di nodi di rete (più di 65.000, modalità di indirizzamento breve)
- Limita la complessità di sviluppo e di implementazione.
- Ha un basso costo complessivo.
- Estende l'autonomia delle batterie che alimentano i nodi.
- Garantisce un elevato livello di sicurezza di trasferimento dati(basato su Advanced Encryption Standard a 128 bit.



Livello 3 - 6LoWPAN

Il protocollo 6LoWPAN (a differenza di Zig Bee o Bluetooth) utilizza direttamente il protocollo IPv6 su reti LoWPAN

6LoWPAN, acronimo di IPv6 over Low-power Wireless Personal Area Network, è un insieme di standard creati dall'IETF (Internet Engineering Task Force) allo scopo di rendere utilizzabile lo stack IP all'interno di reti wireless composte da dispositivi a basse prestazioni. Questo insieme di standard definisce i meccanismi di incapsulazione e di compressione dell'header del messaggio, il quale consente la trasmissione di pacchetti IPv6 in applicazioni «constrained».

Sebbene 6LoWPAN supporti sia TCP/IP che UDP/IP, il protocollo di trasporto UDP è quello più comunemente utilizzato. A differenza del TCP esso è caratterizzato da un minor numero di controlli sui pacchetti. Questa caratteristica lo rende più veloce, anche se meno affidabile. Inoltre UDP è un protocollo di tipo «stateless», cioè non tiene traccia dello stato della connessione e dunque memorizza un minor numero di informazioni rispetto al protocollo TCP. Queste peculiarità lo rendono preferibile al TCP in applicazioni caratterizzate da un elevato numero di dispositivi a basse prestazioni collegati in rete, quali, ad esempio, le wireless sensor networks.

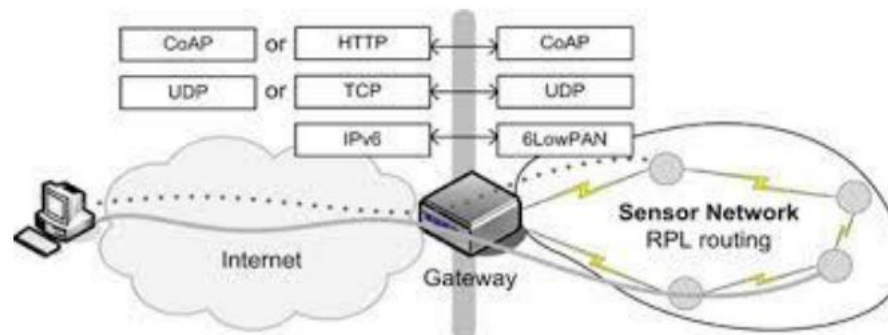
Un'altra peculiarità è l'introduzione di un livello di adattamento (adaptation layer) che consente ai pacchetti IPv6 di adeguarsi allo standard IEEE 802.15.4 attraverso funzioni di : Compressione dell'header, Frammentazione e riassmeblaggio dei pacchetti, Edge Routing

Livello 4 (trasporto/routing) : IETF RPL

Il protocollo IEEE 802.15.4 non si occupa di gestire il routing che viene invece effettuato ad un livello più alto della rete. E' nata quindi l'esigenza di sviluppare un protocollo di routing pensato appositamente per le reti di sensori. Esso deve garantire un breve percorso dei pacchetti, quindi un basso consumo di energia e deve essere a conoscenza della topologia globale della rete.

L'IETF (Internet Engineering Task Force) ha quindi formato un nuovo gruppo di lavoro, il ROLL (Routing Over Low-power and Lossy networks working group), per sviluppare un nuovo protocollo di routing che prende il nome di RPL (Ipv6 Routing Protocol for Low power and lossy network).

Esso utilizza un approccio proattivo di tipo distance-vector: le informazioni di routing sono acquisite prima che sia necessario inviare un pacchetto ed ai link di collegamento è associato un costo. I vari router salvano localmente le informazioni sul next hop all'interno della loro routing table



Livello 5-6 (Sessione-Presentazione) : REST vs SOAP

Per fare in modo che gli Smart Objects forniscano servizi Web componibili ed interoperabili si utilizza il concetto di **web service**.

Un Web Service è un'applicazione software identificata da un URI (Uniform Resource Identifier), le cui interfacce pubbliche e relativi binding sono definiti e descritti in XML (eXtensible Markup Language). La sua definizione può esser ritrovata da altre applicazioni software. Questi ultimi possono poi interagire con il WS seguendo le direttive presenti nella definizione del servizio, usando messaggi XML trasportati da protocolli internet

REST (Representational State Transfer) e un **SOAP** (Simple object Access Protocol) sono modelli architetturali basati su http per lo sviluppo di servizi web. Data la maggiore leggerezza di REST, sia in termini di dimensione dei pacchetti, sia di elaborazione da parte dei nodi, questo paradigma viene nettamente preferito a SOAP per le applicazioni IOT/IoMT.

In REST ogni risorsa è identificata da una URL, mentre l'operazione da eseguire su di essa è già descritta dalla istruzione della richiesta HTTP (le fondamentali sono GET, POST, PUT e DELETE). Quindi l'operazione da eseguire e la risorsa destinataria sono già pienamente descritte nell'header HTTP senza bisogno di layer intermedi come in SOAP.

Inoltre il payload delle risposte non ha bisogno di codifiche particolari, anche se in certi casi, come nel trasferimento di dati, è più semplice usare XML.

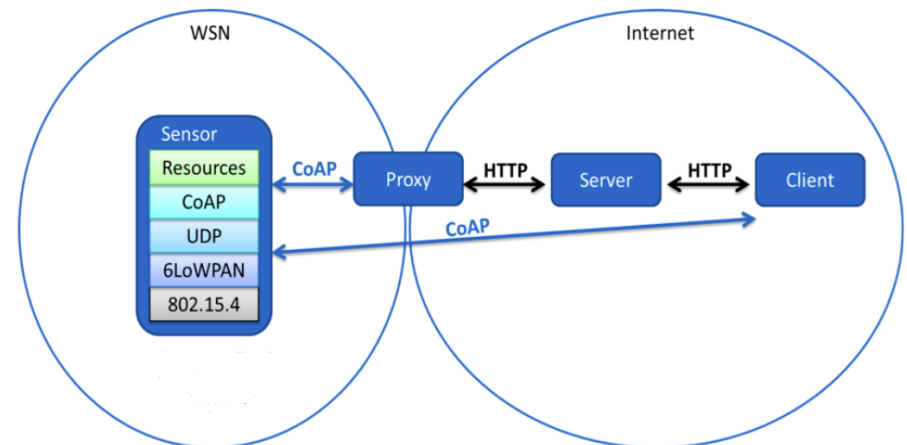
Livello 7 (Applicazione) : COAP

Una caratteristica particolare degli Smart Object è che nel modello di comunicazione previsto dalle applicazioni che li supportano, la presenza dell'uomo è pressoché inesistente. I dispositivi interagiscono fra di loro in modo autonomo, acquisendo dati ed elaborandoli ovvero generando eventi a seguito dell'elaborazione.

Ad esempio, il rilevamento di una temperatura da parte di un sensore può generare un segnale di allarme se la temperatura rilevata eccede una certa soglia.

COAP (Constrained Application Protocol), un protocollo di comunicazione leggero progettato per dispositivi con risorse limitate, con comunicazioni Machine 2 Machine. tipici dell'Internet of Things (IoT). È definito dallo standard IETF RFC 7252. Offre un modello REST-like simile a HTTP ma molto più leggero.

- Basato su UDP → messaggi più piccoli e veloci, senza overhead di TCP.
- RESTful → usa metodi simili a HTTP: GET, POST, PUT, DELETE.
- Ottimizzato per IoT → basso consumo energetico, supporto multicast, semplicità.
- Interoperabile con HTTP → può essere facilmente tradotto verso servizi web tradizionali con possibilità di realizzare proxy per garantire a nodi HTTP l'accesso a risorse CoAP e viceversa.
- Supporta reti a bassa potenza e alta perdita (LLN).
- Formato messaggi compatto → il più piccolo è di soli 4 byte
- Scambio asincrono di messaggi
- Basso overhead e bassa complessità di parsing dell'header
- Realizzazione in modo semplice delle intermediazioni con proxy.
- Possibilità di memorizzare le risposte in cache onde ridurre tempi di risposta ed occupazione di banda.



L'utilizzo in ambito sanitario è ancora molto limitato

Livello 7 (Applicazione) : HL7 - FHIR

Lo standard HL7-FHIR è fondamentale per l'interoperabilità e la condivisione di dati clinici in ambito IoMT. Ecco alcuni punti chiave sull'uso di HL7-FHIR in IoMT:

- **FHIR semplifica la gestione delle cure:** Permette la condivisione di informazioni sanitarie tra vari sistemi informatici, migliorando l'interoperabilità e il coordinamento dell'assistenza sanitaria.
- **API RESTful:** Utilizza API RESTful per consentire lo scambio continuo di dati in tempo reale, facilitando l'accesso ai dati clinici da qualsiasi sistema sanitario.
- **Interoperabilità e riutilizzo:** FHIR supporta l'interoperabilità e il riutilizzo dei dati clinici, contribuendo a una visione unificata delle informazioni dei pazienti.

N.B. - Richiede delle interfacce di traduzione tra le WSN e il sistema informativo che gestisce il dato clinico che attraverso apposite API convertano i dati acquisiti.