



Istituto di Scienza e Tecnologie
dell'Informazione "A. Faedo"
Consiglio Nazionale delle Ricerche



ISTI Technical Reports

Studio e analisi di strumenti per le reti sensoriali per il comfort nella casa da parte dell'utente

Vittorio Miori, CNR-ISTI, Pisa, Italy

Dario Russo, CNR-ISTI, Pisa, Italy

Luca Ferrucci, CNR-ISTI, Pisa, Italy



Studio e analisi di strumenti per le reti sensoriali per il comfort nella casa da parte dell'utente
Miori V.; Russo D.; Ferrucci L.
ISTI-TR-2020/021

Abstract

Il documento analizza le reti di sensori che fungono da infrastruttura per la rilevazione e la raccolta delle informazioni utili al miglioramento del comfort nelle abitazioni, ipotizzando le possibili soluzioni adottabili. Vengono altresì discusse le problematiche che dovranno essere affrontate nei laboratori di sperimentazione sul tema, oltre alla presentazione e all'analisi di alcuni strumenti hardware e software, consoni alla valutazione delle reti sensoriali stesse.

Comfort, Monitoraggio ambientale, Reti di sensori, Wireless network, ZigBee, Protocollo di comunicazione, Middleware, Consumi energetici, IEEE 802.15

Citation

Miori V.; Russo D.; Ferrucci L. *Studio e analisi di strumenti per le reti sensoriali per il comfort nella casa da parte dell'utente* ISTI Technical Reports 2020/021. DOI: 10.32079/ISTI-TR-2020/021

Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "A. Faedo"
Area della Ricerca CNR di Pisa
Via G. Moruzzi 1
56124 Pisa Italy
<http://www.isti.cnr.it>

Studio e analisi di strumenti per le reti sensoriali per il comfort nella casa da parte dell'utente

Vittorio Miori (CNR) – Dario Russo (CNR) – Luca Ferrucci (CNR)

Breve sommario

Il documento analizza le reti di sensori che fungono da infrastruttura per la rilevazione e la raccolta delle informazioni utili al miglioramento del comfort nelle abitazioni, ipotizzando le possibili soluzioni adottabili. Vengono altresì discusse le problematiche che dovranno essere affrontate nei laboratori di sperimentazione sul tema, oltre alla presentazione e all'analisi di alcuni strumenti hardware e software, consoni alla valutazione delle reti sensoriali stesse.

Parole chiave

Comfort, monitoraggio ambientale, reti di sensori, wireless network, ZigBee, protocollo di comunicazione, middleware, consumi energetici, IEEE 802.15

Sommario

OR 3 – MANAGER DEL COMFORT.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Breve sommario	2
Parole chiave	2
approvazioni.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
Revisioni	Errore. Il segnalibro non è definito.
Sommario	3
Indice delle figure	5
Introduzione	6
2 Il benessere ambientale	8
2.1 Sistema di regolazione.....	8
3 Le tecnologie abilitanti e loro evoluzione.....	11
4 Reti sensoriali	15
5 Scenari applicativi.....	17
6 Architettura Protocollare.....	19
6.1 Livello Fisico.....	20
6.2 Livello Data Link.....	20
6.3 Livello Rete	20
7 Lo standard IEEE 802.15.4	21
7.1 Livello Fisico.....	21
7.2 Livello di Accesso al Mezzo.....	21
7.3 Protocolli MAC.....	22
7.3.1 S-MAC.....	22
7.3.2 T-MAC	23
7.3.3 B-MAC.....	23
7.3.4 LEACH	23
7.4 Protocolli di Routing	23
7.4.1 SPIN	24
7.4.2 Directed Diffusion Protocol	25
7.4.3 LEACH	25
7.4.4 PEGASIS	25
7.4.5 GEAR.....	25
7.5 Il laboratorio di sperimentazione	27
7.6 Il Middleware	29
7.6.1 Funzionalità	29
7.6.2 Architettura del Middleware	30
8 Valutazione della rete di sensori	33

8.1 Strumenti di utilizzo.....	36
8.1.1 RF4CE-EK	36
8.1.4 Radio Controller Board	37
8.1.6 Sniffer	39
8.2 Valutazione dei consumi energetici.....	40
8.3 I consumi dei nodi	40
8.3.1 Configurazione ZED – ZC.....	42
8.4 Altre tecnologie di trasporto	43
Riferimenti.....	45

Indice delle figure

Figura 1: L'architettura di rete di sensori.....	15
Figura 2: Stack protocollare secondo il modello ISO/OSI	19
Figura 3: Architettura generale del sistema	28
Figura 4: Separazione dei Bus di comunicazione.....	31
Figura 5: Kit di valutazione Atmel RF4CE	36
Figura 6: Atmel RCB128RFA1, vista frontale e vista dorsale	37
Figura 7: Sensor Terminal Board + RCB	38
Figura 8: CC2531 USB dongle, Texas Instruments	39
Figura 9: ZED, caratteristiche principali	41
Figura 10: Sequenza di POLL.....	42
Figura 11: Sequenza delle operazioni.....	42
Figura 12: Sequenza di dati	42
Figura 13: Comparazione delle principali tecnologie wir	43
Figura 14: Consumi energetici dei chip di riferimento	44

Introduzione

Le reti di sensori sono particolari reti ad-hoc costituite da un insieme di dispositivi di dimensioni ridotte e limitata potenza di calcolo. Ognuno di tali dispositivi è dotato di un sottosistema di comunicazione, un'unità di elaborazione dati e uno o più sensori per l'acquisizione di grandezze fisiche d'interesse come, ad esempio, il consumo di energia del dispositivo elettrico monitorato, la temperatura, l'umidità, l'inquinamento o la luminosità ambientale. Nell'ambito del progetto, tali reti sono utilizzate per la raccolta e la gestione dei dati ambientali e di utilizzo dei dispositivi e dei carichi elettrici.

La rete di sensori da impiegare nella progettazione e implementazione del manager del comfort del sistema SHELL, sarà basata su una tecnologia eterogenea sia dal punto di vista "sensoriale", che dal punto di vista del sistema di comunicazione usato. La gestione di un tale scenario di rete richiede l'implementazione di diverse funzionalità. In particolare:

1. Protocolli per la gestione della topologia di rete.
2. Protocolli ottimizzati per la gestione dell'instradamento dell'informazione dai nodi sensori verso i punti di raccolta ed elaborazione (e viceversa).
3. Soluzioni architetturali per l'interoperabilità della rete di sensori con reti e sistemi esterni, al fine di rendere accessibili i dati ottenuti sul campo.
4. Interfacce per l'accesso alle informazioni e la gestione e configurazione dei sensori.

L'evoluzione tecnologica sta portando a sensori autonomi ma dotati di energia limitata e non rinnovabile. Il problema della limitatezza dell'energia in questi dispositivi viene trattato principalmente tramite due metodologie che riguardano l'alimentazione energetica dei sensori e lo strumento di comunicazione dei dati rilevati.

Per quel che riguarda il sistema di alimentazione dei sensori la problematica viene affrontata attraverso la ricerca di fonti alternative alle normali batterie, il cosiddetto Energy Harvesting o Energy Scavenging e per la comunicazione con l'utilizzo di protocolli "Energy-Efficient" (o Power-Aware), quindi protocolli ad alta efficienza energetica. L'Energy harvesting e gli standard a basso consumo rappresentano dunque le tecnologie chiave alla base dei sensori e degli attuatori più innovativi.

In particolare, l'energy harvesting, una tecnologia che converte l'energia presente nell'ambiente in energia elettrica utilizzabile, sta diventando la tecnica principale per l'accumulo dell'energia ambientale, rappresentando quindi il futuro in termini di auto-alimentazione energetica di sensori ed attuatori.

Sono dunque in crescita le applicazioni dell'energy harvesting nella sensoristica e nella building automation. L'ambiente che ci circonda è ricco di fonti di energia che, se ben sfruttate, possono dare un buon contributo alla richiesta energetica odierna. Tecnologie sempre più moderne ed efficienti hanno permesso di estrarre dalla natura energia pulita ed economica in grado di integrare la produzione di impianti di potenza convenzionali o, addirittura, di rendere energeticamente indipendenti intere unità

abitative. Il progresso in questa disciplina ha permesso di creare apparecchiature elettroniche con prestazioni sempre maggiori, abbattendo parallelamente i consumi per alimentarle.

L'introduzione e la messa a punto di energy harvesters, tuttora in costante evoluzione, ha permesso di rendere autonomi dispositivi elettronici per mezzo di una fonte, almeno virtualmente, inesauribile.

A causa delle piccole potenze in gioco, che vanno da qualche nano-watts a poche centinaia di milli-watts per centimetro cubo, l'energy harvesting si riferisce in particolare alle tecnologie a bassissimo consumo.

2 Il benessere ambientale

Attraverso un'adeguata progettazione, si possono controllare sia i valori di temperatura e umidità dell'aria sia la ventilazione. Ad esempio, è stato osservato che, in un ambiente moderato in condizioni stazionarie, la percentuale di persone insoddisfatte si riduce al minimo in corrispondenza di alcuni valori assunti dalle grandezze microclimatiche[1][2][3].

Gli studi condotti negli scorsi decenni sul comfort termico sono rivolti alla definizione e allo sviluppo di modelli matematici in grado di prevedere le sensazioni soggettive e definire il campo di temperature per raggiungere il comfort [4][5].

La maggior parte di tali indagini sono state recepite all'interno delle normative vigenti in materia; come gli studi sperimentali condotti da Fanger (dal 1970 in poi) che sono poi convogliati all'interno della norma UNI ISO 7730e della norma ASHRAE 55 [6].

Negli ultimi 20 anni, le ricerche che riguardano il comfort termico si sono intensificate, nell'ottica di migliorare l'efficienza energetica negli edifici e ridurre gli elevati consumi del settore residenziale [7] [8] [9].

Inoltre, la sinergia tra l'ambiente di vita e i suoi occupanti è diventata sempre più al centro delle scelte progettuali, tenendo conto sia di fattori di natura fisica che psicologica, anche in termini di sicurezza e salute. Ciò è reso possibile anche grazie allo sviluppo di nuovi sistemi per il controllo e la gestione dei parametri microclimatici negli ambienti indoor, verso cui le ricerche si stanno rivolgendo [10] [11]

2.1 Sistema di regolazione

La regolazione di temperatura e umidità, oggi prevalentemente automatizzata, consente un uso razionale dell'energia evitando gli sprechi.

I componenti di un sistema di regolazione sono:

- sonde (o sensori);
- regolatori;
- attuatori;
- organi di regolazione.

Ad esempio, la grandezza che di solito si vuole controllare negli impianti per la climatizzazione invernale è la temperatura dal momento che incide maggiormente sulle condizioni di comfort.

La regolazione della temperatura può essere effettuata attraverso cronotermostati o valvole termostatiche applicate ai radiatori. Tutto ciò avviene grazie all'ausilio di sensori di temperatura e umidità.

Il segnale in ingresso è il valore di temperatura misurato che viene confrontato con quello prefissato (set point) impostato dall'utente. Il regolatore è il dispositivo che effettua il confronto (ad esempio, un termostato).

Un algoritmo di regolazione agisce sull'attuatore (segnale in uscita): l'algoritmo di regolazione è una relazione che lega il segnale in ingresso con il segnale in uscita. L'attuatore aziona l'organo di regolazione (ad esempio, una valvola o un relé).

Se tra il valore misurato e il valore di set point esiste uno scostamento, il regolatore attiva l'organo di regolazione (ad esempio una valvola che regola il flusso del fluido termovettore) finché non si annulla la differenza tra la grandezza termoigrometrica rilevata e il valore di riferimento (sistema a circuito chiuso).

Il tempo di risposta del sistema che viene controllato è uno dei parametri che indica l'efficienza del sistema di controllo.

I tradizionali algoritmi di regolazione sono:

- A due posizioni (on/off): il segnale in uscita assume solo due valori (tutto o niente). L'attuatore si sposta da una posizione all'altra appena la variabile controllata si scosta dal punto prefissato di regolazione.
- Proporzionale (P): l'attuatore assume posizioni proporzionali allo scostamento della grandezza dal valore voluto.
- Integrale (I): l'azione integrale (basata sui valori passati della grandezza) agisce sull'attuatore con velocità proporzionale all'entità dello scostamento della grandezza dal valore voluto. Non esiste un rapporto diretto tra lo scostamento e la posizione dell'attuatore, come nel caso dell'azione proporzionale.
- Proporzionale /Integrale (PI): utilizza i vantaggi rappresentati dalla pronta risposta del regolatore proporzionale, in funzione del valore dello scostamento, con l'indipendenza dal carico del regolatore integrale.
- Derivativo (D): la componente derivativa produce un segnale di comando in base alla velocità e solo nel momento che si verifica uno scostamento della grandezza regolata dal valore voluto.
- Proporzionale/ integrale/ derivativo (PID): i regolatori PID utilizzano tutte e tre le azioni formando un segnale di comando in base alla velocità dello scostamento(D), della sua ampiezza (P) che continua nel tempo (I) fino all'annullamento dello scostamento.
- Logica "Fuzzy": è una teoria di controllo automatico introdotta nella seconda metà degli anni Sessanta, contrapposta alla logica binaria (vero/falso, 0/1). Una variabile può assumere vari gradi di verità, indicati da un numero compreso tra 0 (falso) e 1 (vero). Alle grandezze considerate si devono attribuire intervalli di variazione che derivano dall'esperienza. Tutte le variabili necessarie

sono elaborate dal regolatore secondo regole precedentemente imposte, costruendo una “tabella delle regole”. Sulla base di questa elaborazione viene prodotto il segnale in uscita [12].

3 Le tecnologie abilitanti e loro evoluzione

I sistemi di comunicazione dei dati e le tecnologie dell'informazione sono componenti essenziali per gli edifici intelligenti moderni. Nuovi standard e protocolli per la comunicazione wireless, infatti, stanno facilitando le comunicazioni o meglio, lo scambio di dati, tra dispositivi e sono fondamentali per le reti di sensori wireless che rappresentano la tecnologia emergente a basso costo per il monitoraggio dei parametri ambientali.

L'energy harvesting e gli standard wireless a basso consumo sono quindi tecnologie abilitanti per i sensori, e saranno sempre più importanti per la gestione e per il risparmio energetico.

Oggi la sfida è dunque sviluppare e diffondere dispositivi wireless e self-powered o autoalimentati, che trovano ampia applicazione nell'automazione degli edifici.

L'evoluzione della tecnologia MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems o sistemi microelettromeccanici), grazie alla capacità di integrare nello stesso dispositivo funzioni diverse sta rivoluzionando intere categorie di prodotti tra i quali figurano anche i sensori. La tecnologia MEMS è in grado di sviluppare nodi sensori wireless economici, che hanno anche il vantaggio di avere dimensioni sempre minori (dal mm a qualche cm). Il mercato principale del micromachining è proprio la sensoristica, dai sensori di pressione agli accelerometri e ai giroscopi, ma, sebbene inizialmente il business si sia concentrato sull'automotive, complice la riduzione dei costi, per i sensori è stata possibile una diffusione in un mercato di massa.

Gli importanti risultati della ricerca nell'ambito dei MEMS stanno dunque contribuendo al processo di miniaturizzazione di tutta una serie di dispositivi sensoriali ed è probabile che in futuro disporremo di sensori wireless mobili dotati di sistemi micromachines.

I recenti progressi tecnologici nei sistemi micro-elettro-meccanici, nelle comunicazioni wireless e nell'elettronica digitale hanno permesso lo sviluppo di apparecchi di dimensioni ridotte, a bassa potenza, dai costi contenuti, multifunzionali e capaci di comunicare tra loro tramite tecnologia wireless. Nuovi standard e protocolli di comunicazione wireless permettono la comunicazione tra apparecchiature all'interno dell'ambiente e sono fondamentali per le reti di sensori wireless (WSN).

I più diffusi stack di comunicazione, come ad esempio Bluetooth, grazie all'introduzione delle versioni a basso consumo sono ideali per applicazioni di questo tipo. Wi-Fi e ZigBee, ad esempio, sono altre opzioni che possono essere prese in considerazione.

Un ottimo candidato per la rete di sensori del manager del comfort del progetto SHELL, è il protocollo ZigBee, il quale garantisce numerosi benefici in termini di consumi.

Un dispositivo basato su ZigBee trascorre la maggior parte del tempo in modalità "sleep" e può essere "risvegliato" in tempi molto brevi per inviare dati. Un controllore remoto ZigBee, per esempio, può operare per molti anni con una batteria a bottone prima che si renda necessaria la sostituzione.

La velocità di trasferimento dati dell'ordine di 250 kbps tende a limitarne l'uso nel caso di presenza di elevati volumi di dati. Per contro ZigBee è ideale per il collegamento in rete di molti dispositivi, caratteristica questa che ne favorisce l'uso in applicazioni quali building automation e "smart metering".

Il protocollo di rete usato dalla WSN, è IEEE 802.15.4/ZigBee: è probabilmente il protocollo di comunicazione più popolare tra dispositivi e sistemi, all'interno dei sistemi di gestione energetica (HEMS) che comprendono i sistemi di controlli della luminosità, la lettura di misure automatica, il rivelatore wireless di fumo e di CO, il controllo HVAC, il controllo del sistema di riscaldamento, la sicurezza, i controlli ambientali [13]

I criteri adottati per la scelta della tecnologia di comunicazione più adatta includono fattori quali velocità di trasferimento dati (data rate) richiesta, bilancio di potenza (power budget), connettività con l'host.

Di contro Bluetooth, sebbene non possa vantare lo stesso profilo in termini di consumo dello ZigBee, ha il vantaggio di garantire rispetto a questo una velocità di trasferimento dati superiore, che arriva a 3 Mbps.

I requisiti di connettività di una rete di sensori wireless potrebbero essere soddisfatti anche utilizzando protocolli noti e divenuti uno standard commerciale, quali Wi-Fi e Bluetooth. Esaminando però nel dettaglio gli obiettivi della nostra Wireless Sensor Network, le criticità per la possibilità di utilizzo di entrambi gli standard sono, rispettivamente, i consumi energetici per il Wi-Fi e del range ridotto (10m) e le limitazioni di copertura per il Bluetooth.

A basse velocità di trasferimento dati, la tecnologia BLE (Bluetooth Low Energy), risulta essere invece più vantaggiosa.

Rispetto al Bluetooth originale, la versione BLE garantisce consumi molto inferiori (in misura compresa tra 1/10mo e 1/20mo). Il protocollo BLE è molto semplice e utilizza pacchetti dati di dimensioni inferiori rispetto alle precedenti versioni di Bluetooth. Grazie al recente lancio del profilo BLE, in futuro, quest'ultimo è destinato a diventare lo standard predominante e verrà preferito a ZigBee nonostante sia caratterizzato da una velocità di trasferimento dati molto prossima a quella di ZigBee.

E' ipotizzabile anche che, la sempre maggiore diffusione di dispositivi consumer portatili, tra cui smartphone e tablet, contribuirà a favorire una crescente adozione di BLE nei prossimi anni.

L'obiettivo dei ricercatori è divenuto dunque lo studio di algoritmi e protocolli che consentano il risparmio energetico, i cosiddetti power-aware protocols.

Si stanno facendo anche molti sforzi di ricerca per ottenere un'interfaccia standardizzata, infatti l'interazione automatica tra sensori implica meccanismi di standardizzazione per la comunicazione.

Di recente, grazie alla drastica riduzione dei consumi energetici, anche le reti di sensori wireless (WSN), lettori MP3, sistemi GPS, cellulari e piccoli laptop possono già integrare sistemi di energy harvesting, sia per la ricarica delle batterie che addirittura per l'auto-alimentazione diretta senza di queste. La possibilità di auto-alimentazione perpetua consentirà l'impiego di queste tecnologie in luoghi inaccessibili. Senza l'energy harvesting risulterebbe infatti impossibile cablare o sostituire migliaia di sensori immersi nelle strutture di edifici o nelle fabbriche.

L'ultra low power energy harvesting rappresenta la tecnologia più innovativa per l'alimentazione delle reti di sensori. È l'unica possibile soluzione per eliminare il bisogno di reti di alimentazione e di batterie, e disporre, così, di nodi sensori autonomi, funzionanti sul lungo periodo (teoricamente all'infinito), che una volta installati non necessitano di alcuna cura particolare ("fit and forget").

Tecnicamente questi sistemi, prodotti adattando le tecniche di fabbricazione microelettroniche alla produzione di strutture meccaniche tridimensionali, sono detti microelettromeccanici, e battezzati come 'power MEMS' quando esplicitamente destinati a raccogliere energia. Tra le possibili applicazioni vi sono la building automation, il comfort ambientale, la sicurezza, l'HVAC, la gestione dell'illuminazione, il controllo accessi. [14]

In questo ambito, di importante rilievo è la tecnologia Enocean, tecnologia wireless di energy harvesting utilizzata soprattutto nei sistemi di building automation, con applicazioni anche nell'industria, nella logistica, nei trasporti e nell'ambito smart homes.

Nei moduli di Enocean vi è una combinazione di convertitori di micro energia con sistemi elettronici ultra low power. E' così possibile una comunicazione wireless tra sensori wireless privi di batterie, interruttori, controllori e gateways.

Questa tecnologia permette la creazione di sensori wireless autoalimentati fondamentali per la gestione energetica degli edifici. I dispositivi wireless EnOcean comunicano con i principali sistemi Bus di building automation quali KNX, LON, BACnet o TCP/IP.

Così lo sviluppo dell'energy harvesting e degli standard wireless a basso costo come ad esempio BLE, ZigBee, Green power, Wi-Fi e le tecnologie Enocean porterà all'ulteriore sviluppo dei WSN in nuove aree di applicazioni come l'edificio ad efficienza energetica.

Uno degli obiettivi delle WSN è la realizzazione di reti aventi tempi di vita molto lunghi e, data la durata limitata delle batterie, solitamente si propende all'integrazione delle stesse con fonti energetiche ausiliari, come l'energia solare attraverso le celle fotovoltaiche, le vibrazioni meccaniche attraverso elementi piezoelettrici/magnetici o il flusso di aria tramite minuscole turbine basate su MEMS. La necessità di mantenere i consumi ridotti, allo scopo di avere elevati tempi di vita, comporta tuttavia una potenza di trasmissione limitata e di conseguenza un range ridotto di copertura wireless. Infine la limitata capacità di memorizzazione dati non consente di lavorare con grandi quantità di informazioni. [15]

I MEMS, nati dalla fusione della tecnologia dei circuiti integrati con la più avanzata tecnologia micromeccanica, trovano interessanti applicazioni nella sensoristica.

Questi sistemi di natura meccanica, elettrica ed elettronica, integrati su un substrato di silicio in forma miniaturizzata, rendono possibile la miniaturizzazione e la produzione di massa di un gran numero di sensori integrati, attuatori e computers. Grazie ai recenti importanti passi avanti nelle tecnologie di fabbricazione e del silicio, questi dispositivi grandi come una particella di polvere ("motes") possono contenere sensori, intelligenza programmabile, tecnologie di comunicazione wireless bidirezionale e l'alimentazione.

I sistemi microelettromeccanici, oltre a consentire lo sviluppo di dispositivi di volume ridotto, sono in grado di garantire un minore consumo di energia. Essi sono stati impiegati in console che permettono agli utenti una partecipazione interattiva, in telefoni cellulari che reagiscono al movimento, nelle fotocamere per la stabilizzazione delle immagini oppure negli airbag e negli ESP delle autovetture.

Per applicazioni di interfaccia uomo-macchina, i sensori forniscono i mezzi per adattare il display e per fornire il controllo tocco/doppio tocco. [16]

Lo scenario di riferimento del manager del comfort, prevede l'utilizzo di reti di sensori distribuite, a tal fine, in questo documento, vengono analizzate le architetture di rete e i protocolli di comunicazione necessari per la raccolta e la gestione dei dati.

Di conseguenza, uno degli obiettivi specifici di questa attività è quello di analizzare lo stato dell'arte della ricerca internazionale sulle piattaforme di comunicazione per reti di sensori e i loro strumenti, con particolare attenzione verso le soluzioni utilizzate per la raccolta di dati per il comfort ambientale.

4 Reti sensoriali

I notevoli progressi tecnologici degli ultimi decenni, sia nell'ambito delle tecnologie della comunicazione che nell'elettronica digitale, hanno permesso la realizzazione di nodi sensore, cioè dispositivi di piccole dimensioni, basso consumo di energia e costi contenuti, capaci di comunicare tra loro su brevi distanze. Ogni nodo sensore è generalmente composto da quattro unità fondamentali:

1. Unità di sensing: è utilizzata per monitorare i parametri di interesse (es., temperatura, luminosità, umidità, rumore, consumo di energia).
2. Unità computazionale: fornisce le capacità computazionali al nodo ed è responsabile del controllo dell'apparato di sensing, dell'esecuzione dei protocolli di comunicazione e dell'elaborazione dei dati raccolti dai sensori.
3. Unità di comunicazione: consente al nodo sensore di comunicare con gli altri nodi.
4. Unità energetica: è solitamente composta da una o più batterie che forniscono energia per il funzionamento del nodo.

In particolare, l'architettura candidata per la nostra rete di sensori, è costituita da più nodi sensore autonomi che prelevano dati dall'ambiente in cui sono posti e comunicano tra di loro al fine di fornire i servizi di monitoraggio d'interesse. L'inoltro dei dati verso il database e/o il sistema esterno, è realizzata mediante l'interconnessione di uno di tali sensori con un apposito server, così come mostrato nell'esempio di Figura 1.

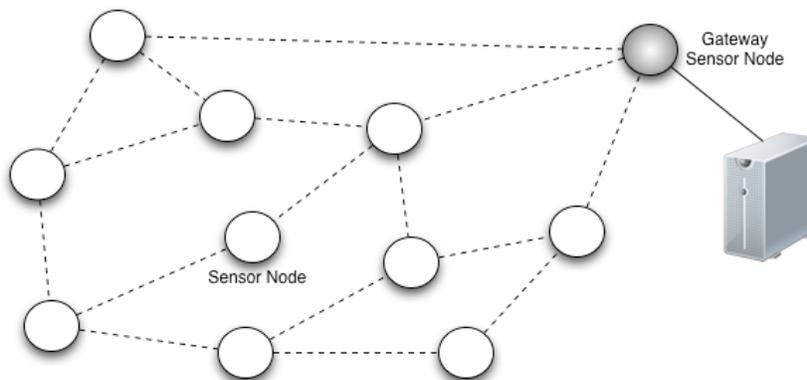


Figura 1: L'architettura di rete di sensori

Seppur la realizzazione e gestione di tale rete sia concettualmente simile a quella di altre tipologie di reti ad-hoc, essa richiede la definizione di soluzioni apposite a causa dei vincoli stringenti che le caratterizzano [17], tra i quali:

- Le reti di sensori può essere composta da un elevato numero di nodi.
- I nodi sensore disposti nell'ambiente in modo molto denso.
- I nodi sono soggetti a malfunzionamenti relativamente frequenti.
- La topologia della rete può cambiare frequentemente.

- I nodi sensore hanno vincoli stringenti in termini di energia, capacità di calcolo e risorse hardware disponibili.

Per tale motivo, al fine della progettazione corretta della rete di sensori, è stato necessario tener conto di una serie di fattori critici [18]:

- Tolleranza ai guasti: la rete deve essere funzionante anche in caso di malfunzionamento di uno o più nodi. Infatti, i nodi sensore sono caratterizzati da un'alta probabilità di malfunzionamento a causa, ad esempio, dell'esaurimento delle batterie o di fenomeni d'interferenza sul canale di comunicazione.
- Scalabilità: la rete di sensori deve garantire il corretto funzionamento della stessa, senza eccessivi ritardi e con un limitato consumo di energia, indipendentemente dal numero di nodi sensori che compongono la rete.
- Costi di produzione: un importante requisito di progettazione è stato che il costo del singolo nodo sensore fosse contenuto, per fare in modo che i costi totali della rete siano ragionevoli.
- Mezzo di trasmissione: la scelta del mezzo trasmissivo e della tecnologia da utilizzare per la comunicazione è dipesa dall'applicazione e dall'ambiente operativo. La soluzione per l'implementazione degli apparati di comunicazione dei sensori è la tecnologia radio operante nella banda non licenziata ISM (Industrial, Scientific and Medical) (868/915 MHz e 2.4/2.4835 GHz).
- Consumo energetico: uno degli obiettivi principali è stato di ottimizzare i consumi di energia al fine aumentare il tempo di funzionamento dei nodi e quindi della rete stessa [19]. Infatti, i sensori sono equipaggiati con una batteria non sostituibile/ricaricabile e dunque il tempo di vita del nodo è strettamente legato alla capacità della batteria e all'efficienza di utilizzo della stessa.

5 Scenari applicativi

Grazie alla loro capacità di monitorare grandezze fisiche di vario tipo in modo flessibile e adattabile al contesto applicativo, le reti di sensori hanno avuto ampio sviluppo in molteplici settori. Una prima suddivisione delle applicazioni basate su rete di sensori, può essere ottenuta in base al loro obiettivo funzionale:

- **Monitoraggio:** le reti di sensori sono utilizzate per monitorare in maniera continuativa una certa grandezza. In tal caso, si richiede tipicamente un campionamento isocrono e fisso dei parametri d'interesse.
- **Riconoscimento di eventi:** i sensori sono utilizzati per rilevare situazioni di allarme o eventi d'interesse.
- **Classificazione di oggetti:** l'obiettivo è il riconoscimento di alcune grandezze tra un insieme di prototipi noti.
- **Tracciamento di oggetti:** la rete di sensori è utilizzata come sistema di sorveglianza, riconoscendo e stimando la posizione di oggetti d'interesse in una determinata area.

Oltre a tale suddivisione, un'ulteriore classificazione può essere definita sulla base delle aree applicative in cui le reti di sensori sono utilizzate:

- **Monitoraggio ambientale:** l'obiettivo è la rilevazione dei parametri negli ambienti di vita e di lavoro, ma può essere anche la misura dei parametri fisici per lo studio dei processi naturali in atto. Esempi di tal tipo di sistemi sono il framework di monitoraggio dello stato e delle variazioni nel tempo dei ghiacciai installato presso la città norvegese di Briksdalsbreen [20], e il sistema ALERT [21], capace di predire e rilevare le inondazioni attraverso una rete in grado di misurare la portata dei fiumi, il livello di precipitazioni e altri parametri riguardanti le condizioni climatiche.
- **Applicazioni militari:** le caratteristiche di auto-organizzazione e di tolleranza ai guasti rendono le reti di sensori un'ottima tecnologia per applicazioni di tipo militare. Esempi di tal tipo sono i sistemi di monitoraggio di luoghi strategici, il riconoscimento dei nemici oppure l'identificazione di agenti chimici o radioattivi in una determinata area [22] [23].
- **Applicazioni mediche:** le reti di sensori sono frequentemente utilizzate anche per il monitoraggio dei parametri biomedici dei pazienti [24] [25]. Il vantaggio di tali soluzioni rispetto ad apparecchiature tradizionali per la diagnostica è rappresentato dalle dimensioni ridotte dei sensori e dall'assenza di collegamenti fisici tra gli stessi che consentono al paziente un'ampia libertà di movimento.

- Monitoraggio di edifici: le reti di sensori sono ampiamente utilizzate anche per la realizzazione di sistemi di monitoraggio e controllo degli edifici. Esempi di tal tipo sono i sistemi di videosorveglianza [26] o i sistemi di controllo del comfort, della temperatura e della luminosità negli edifici che, tramite le informazioni raccolte da reti di sensori, permettono di ottimizzare l'utilizzo d'impianti d'illuminazione e controllo HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) [27].

6 Architettura Protocollore

L'architettura protocollore delle reti di sensori può essere definita e descritta in base al modello ISO-OSI [28] (vedi Figura 2), anche se la separazione dei layer in tal tipo di reti non è sempre così netta come nel modello teorico. Infatti, in molteplici sistemi basati su reti di sensori, i vari livelli del modello OSI sono sovrapposti tra loro al fine di definire reti di comunicazione più efficienti, leggere e flessibili ai cambiamenti dello scenario d'uso. Il livello MAC e il livello di rete, ad esempio, sono talvolta definiti per lavorare in collaborazione tra loro, violando così il principio di separazione dei livelli. In questi casi, OSI parla di una nuova generazione di protocolli, detti cross-layer [29].

Di seguito si descrivono brevemente i primi tre livelli della pila protocollore.

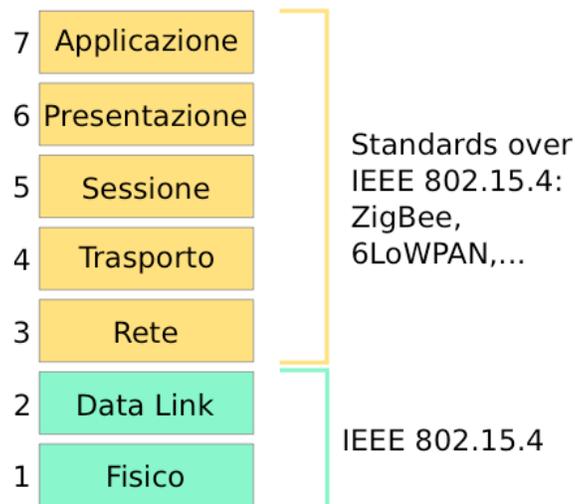


Figura 2: Stack protocollore secondo il modello ISO/OSI

6.1 Livello Fisico

Il livello fisico si occupa della trasmissione dei dati sul mezzo trasmissivo. Esistono diversi standard riguardanti la gestione del mezzo trasmissivo, tra cui il principale è lo standard IEEE 802.15.4. In tale standard, il livello fisico ha diverse funzionalità, tra le quali il compito di accendere e spegnere il sistema radio, misurare l'energia ricevuta e stimare la qualità del canale e fornire una serie di primitive per selezionare il canale da utilizzare.

6.2 Livello Data Link

Il livello data link si occupa di formare i dati da inviare attraverso il livello fisico e di controllare il flusso dati tramite funzioni di controllo d'errore. Tale livello è diviso in due sottolivelli: Logical Link Control (LLC) e Medium Access Control (MAC). Il primo fornisce servizi di controllo di flusso mediante rilevazione, correzione degli errori o conferma di avvenuta ricezione (tramite messaggi di acknowledgement, o ACK). Il livello MAC, invece, si occupa principalmente della gestione dell'accesso al mezzo fisico condiviso. Anche per tale livello, lo standard di riferimento è l'IEEE 802.15.4.

6.3 Livello Rete

Il livello rete si occupa principalmente dell'instradamento dei pacchetti tra nodi della rete, tramite l'applicazione di un opportuno algoritmo di routing. Tale algoritmo ha il compito di determinare il cammino ottimo tra nodo sorgente e nodo destinazione in conformità a una metrica d'interesse.

7 Lo standard IEEE 802.15.4

L'IEEE 802.15 è lo standard su cui è basato il protocollo ZigBee. Esso rappresenta una famiglia di standard per tecnologie di tipo wireless, a corto raggio e bassa potenza, dette Wireless Personal Area Network (WPAN). Nel corso degli anni, tale working group ha definito diverse famiglie di standard per WPAN, tra cui l'IEEE 802.15.4 [30], che specifica le caratteristiche del livello fisico e data link della pila protocollare ISO-OSI delle reti WPAN a basso rate. Di seguito si mostrano le specifiche dello standard per il livello fisico di trasmissione e il livello di accesso al mezzo.

7.1 Livello Fisico

Lo standard IEEE 802.15.4 prevede quattro diversi schemi di modulazione in tre bande di funzionamento principali per la trasmissione dei dati:

- Trasmissione a frequenza 868/915 MHz (868 MHz per l'Europa, 915 MHz per gli Stati Uniti) con codifica Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) e modulazione Binary Phase Shift Keying (BPSK).
- Trasmissione a frequenza 2.4 GHz (ISM) con codifica DSSS e modulazione Offset-Quadrature Phase Shift Keying (O-QPSK).
- Trasmissione a frequenza 868/915 MHz con codifica DSSS e modulazione O-QPSK.
- Trasmissione a frequenza 868/915 MHz con codifica Parallel Sequence Spread Spectrum (PSSS) e modulazione BPSK o Amplitude Shift Keying (ASK).

I primi due schemi di modulazione consentono di ottenere bit rate di 20 Kb/s con 1 canale in banda 868 MHz, 40 Kb/s con 10 canali in banda 915 MHz e 250 Kb/s con 16 canali in banda 2.4 GHz. Gli ultimi due schemi di modulazione, aggiunti nelle revisioni successive dello standard, consentono di raggiungere bit rate di 250 Kb/s anche nelle bande 868 e 915 MHz.

Oltre alle specifiche d'oltro dei dati, il livello fisico dello standard 802.15.4 definisce anche alcune primitive per il controllo del canale radio:

- Energy detection: rappresenta il livello di energia del segnale ricevuto ed è utilizzato per la selezione del canale da utilizzare per la definizione della rete di sensori.
- Link quality indicator: rappresenta una misura della qualità del link ottenuta sulla base della potenza dei pacchetti ricevuti e della loro correttezza.
- Clear channel assessment: permette di effettuare una stima dell'occupazione del canale attraverso un breve monitoraggio dello stesso ed è utile per evitare collisioni nella trasmissione.

7.2 Livello di Accesso al Mezzo

Lo standard in esame utilizza un accesso al mezzo di tipo Carrier Sense Multiple Access (CSMA)/Collision Avoidance (CA), in cui la rilevazione della portante è ottenuta utilizzando la funzione di clear channel assessment. Tale tecnica d'accesso al mezzo è disponibile in due diverse modalità di funzionamento: beaconless e beacon-enabled. Nel primo caso, i nodi della rete non trasmettano la trama di beacon e l'accesso al canale è di tipo CSMA/CA non sincronizzato. In modalità beacon-enabled, invece, tutti i dispositivi sono sincronizzati attraverso i messaggi di beacon trasmessi periodicamente dal nodo coordinatore della rete. In tal caso, la "vita" della rete è divisa in due intervalli: un periodo di accesso a contesa, in cui i nodi si condividono il canale secondo uno schema di tipo CSMA/CA a slot, ed un periodo contention-free in cui possono trasmettere solo i nodi autorizzati dal coordinatore della rete.

7.3 Protocolli MAC

Lo standard IEEE 802.15.4 definisce un protocollo di accesso al mezzo generico senza alcun riferimento allo scenario applicativo. Per tale motivo, al fine di migliorare le prestazioni di tale standard, in letteratura sono state proposte sia delle modifiche allo stesso [31], [32], sia dei protocolli MAC alternativi. Molti di questi lavori sono finalizzati a ottimizzare il consumo energetico dei sensori tramite due diversi approcci:

- Accesso al mezzo a contesa con minimizzazione delle collisioni delle trasmissioni (es., T-MAC, S-MAC, B-MAC e X-MAC).
- Sincronizzazione dei nodi sensore mediante protocollo Time Division Multiple Access (TDMA) con eliminazione delle collisioni (es., LEACH e TRAMA).

Di seguito, si riporta una breve descrizione di alcuni di questi protocolli.

7.3.1 S-MAC

Il protocollo Sensor Medium Access Control (S-MAC) [33] prevede che ogni sensore alterni periodi di sleep e periodi di attività. Durante lo stato di sleep, il nodo spegne la propria radio riducendo di conseguenza il suo consumo di energia. Nei periodi di attività, invece, i sensori possono scambiare pacchetti tra di loro e la gestione dell'accesso al mezzo avviene mediante l'utilizzo del protocollo CSMA/CA. Al fine di consentire la sincronizzazione delle finestre di attività dei sensori interessati a comunicare tra loro, S-MAC prevede che i nodi comunichino in broadcast il proprio schedule (ovvero le informazioni riguardanti la loro sequenza di periodi di accensione e sleep) all'inizio di ciascun periodo di attività.

Tale protocollo introduce ovviamente dei ritardi nella trasmissione dei dati, anche se consente di ottenere un risparmio energetico del 50% rispetto allo standard.

7.3.2 T-MAC

Il protocollo Timeout Medium Access Control (T-MAC) [34] ottimizza il protocollo S-MAC, evitando di mantenere accesa la radio dei sensori per tutto il periodo di attività nel caso non vi sia traffico sulla rete. In tal modo, i sensori sono in grado di adattare il loro tempo di attività alle condizioni di traffico della rete.

Tale protocollo, seppure consenta di ridurre ulteriormente il consumo di energia della rete di sensori, può introdurre ulteriori ritardi nella consegna dei pacchetti.

7.3.3 B-MAC

Il protocollo Berkeley Medium Access Control (B-MAC) [35] è un protocollo molto leggero ideato per trasmissioni punto-punto. Tale protocollo consente l'accesso a contesa al mezzo trasmissivo con modalità simili allo standard IEEE 802.15.4. Al fine di migliorare l'efficienza di tale standard, B-MAC definisce un'apposita tecnica per la stima dello stato del canale, detta Low Power Listening (LPL), in cui il canale viene campionato per brevissimi intervalli di tempo, permettendo una notevole riduzione del consumo energetico associato a tale fase.

I parametri di funzionamento di tale protocollo possono essere adattati alle condizioni della rete, in modo da ottenere il miglior compromesso tra throughput, ritardo e consumo energetico.

7.3.4 LEACH

Il protocollo Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) [36] utilizza un meccanismo TDMA per condividere la risorsa radio tra i diversi nodi della rete. In particolare, tale protocollo prevede che i nodi limitrofi della rete si auto-organizzino in cluster, ciascuno dei quali è gestito da un nodo coordinatore. Tale sensore ha il compito di assegnare gli slot temporali di trasmissione a ciascun dispositivo del proprio gruppo e di inoltrare alla stazione base i dati ricevuti da tali dispositivi. Data la distanza ridotta tra i sensori di ciascun cluster, la comunicazione tra gli stessi può essere effettuata con livelli di potenza contenuti. Quest'approccio, che permette di definire schemi di schedule di tipo gerarchico, consente di ridurre l'energia consumata dalla rete di sensori fino a 7/8 volte rispetto al caso di comunicazione diretta di tutti i nodi con la stazione base.

7.4 Protocolli di Routing

Nell'ambito delle reti di sensori, un ruolo fondamentale è ricoperto dal livello di networking che si occupa principalmente dell'instradamento delle informazioni tra i nodi della rete sulla base di un opportuno protocollo di routing. Tali protocolli per reti di sensori possono essere classificati secondo diversi criteri. Innanzitutto, una prima distinzione può essere ottenuta in base al meccanismo utilizzato per la definizione delle rotte nella rete, distinguendo così tra protocolli reattivi, proattivi oppure ibridi. Nel primo caso, i cammini d'instradamento sono definiti solo quando i sensori hanno informazioni da trasmettere. Tale approccio determina un basso overhead dato che il traffico di segnalazioni per la creazione e gestione delle rotte è utilizzato solo se necessario. Tuttavia, il ritardo legato alla fase di creazione dei percorsi può rendere tali soluzioni non adatte ad applicazioni con requisiti temporali stringenti. Nel caso di algoritmi proattivi, invece, i percorsi tra i nodi sono sempre definiti e noti. In questo modo, si riducono i ritardi di trasmissioni a discapito di maggiore overhead dovuto al continuo scambio di traffico di segnalazione. I protocolli ibridi, infine, utilizzano una combinazione delle due precedenti tecniche.

Un'ulteriore classificazione dei protocolli di routing per reti di sensori può essere ottenuta in base alla struttura della rete:

- Flat-based: i nodi hanno un ruolo paritetico nello svolgimento delle funzionalità di routing (es., SPIN, Direct Diffusion Protocol).
- Gerarchico: i sensori hanno caratteristiche differenti e svolgono ruoli diversi nella fase di routing (es., LEACH, PEGASIS). Tipicamente, tali protocolli prevedono che la rete sia suddivisa in cluster di nodi, ciascuno gestito da un nodo avente il ruolo di cluster-head. Tale nodo ha il compito di raccogliere le informazioni e di svolgere operazioni di aggregazione e instradamento dei dati verso la stazione base.
- Geografico (o location-based): il routing dei pacchetti è realizzato sulla base d'informazioni geografiche (es., GEAR). Questa tipologia di routing prevede di identificare i nodi per mezzo della loro posizione, stimata, ad esempio, sulla base della potenza dei segnali scambiati tra i sensori o tramite strumenti GPS montati sui nodi stessi.

Di seguito, si riporta una breve descrizione di alcuni di questi protocolli.

7.4.1 SPIN

Il protocollo Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) [37] utilizza metadati di alto livello per identificare i dati e trasmetterli efficientemente nella rete. Nello specifico, prima della trasmissione del dato vero e proprio, il nodo comunica ai propri vicini il metadato corrispondente all'informazione di cui è in possesso. I sensori interessati a tale informazione possono richiedere la trasmissione della stessa mediante un pacchetto di richiesta. Tale procedura viene reiterata da ogni nodo al fine di diffondere il dato nella rete. Seppure si tratti di un protocollo molto semplice, SPIN consente di migliorare le prestazioni energetiche della rete limitando la diffusione dei dati.

7.4.2 Directed Diffusion Protocol

Anche nel protocollo Direct Diffusion [38], così come per SPIN, i percorsi d'instradamento delle informazioni sono creati in base alle caratteristiche dei dati monitorati dai sensori. Nello specifico, ogni nodo associa ai dati che genera uno o più attributi e comunica gli stessi all'interno della rete. Tali attributi sono utilizzati dagli altri nodi della rete per verificare se vi sia interesse o meno rispetto a quel tipo d'informazione. Gli interessi dei sensori sono utilizzati per definire i gradienti su cui vengono inoltrati i dati diffusi (tipicamente reverse paths).

7.4.3 LEACH

Il protocollo LEACH [36] introdotto in precedenza in riferimento ai meccanismi di accesso al mezzo, offre anche funzionalità di routing di tipo gerarchico. In tale soluzione, nella fase di costruzione dei cluster (effettuata periodicamente), il nodo cluster-head viene selezionato in modo casuale e la formazione dei cluster è realizzata sulla base della potenza del segnale ricevuto dal cluster-head (i nodi si associano al cluster-head che richiede minor potenza in trasmissione per poter essere raggiunto). Dopo aver ricevuto le notifiche da parte di tutti i nodi del cluster, il cluster-head assegna a ciascuno di essi un intervallo di tempo per la trasmissione dei dati.

7.4.4 PEGASIS

Il protocollo Power Efficient GATHERing in Sensor Information Systems (PEGASIS) [39] rappresenta, di fatto, un'evoluzione di LEACH finalizzata a migliorare le prestazioni di tale soluzione. La principale peculiarità di PEGASIS consiste nella creazione di gruppi di nodi secondo una topologia di tipo lineare in modo tale che ciascuno di essi trasmetta e riceva pacchetti esclusivamente verso i nodi più vicini (ovvero quelli che richiedono una minor potenza di segnale per effettuare la comunicazione). Per ciascuno di tali gruppi, la trasmissione verso la stazione base viene gestita da un nodo leader selezionato in maniera casuale ad ogni round di comunicazione.

7.4.5 GEAR

Il protocollo Geographic Energy Aware Routing (GEAR) [40] rappresenta una soluzione di tipo location-based in cui i nodi dei cammini di routing sono individuati in maniera euristica sulla base delle

informazioni geografiche e di consumo energetico dei sensori. In tale protocollo, ogni nodo memorizza due parametri per raggiungere una destinazione: costo stimato e appreso. Il primo è calcolato in base ad una combinazione tra l'energia residua del nodo e la distanza dalla destinazione. Il costo appreso, invece, è un raffinamento del costo stimato in cui si tiene conto di eventuali "buchi" presenti nella rete (i buchi si presentano quando non vi sono sensori più prossimi all'area di destinazione). Se la rete non presenta buchi, il costo stimato coincide con quello appreso.

Per l'instradamento dei pacchetti, GEAR offre due alternative: il forward verso la regione target, oppure il forward all'interno della regione. Nel primo caso, quando un nodo riceve un pacchetto, controlla se esiste un suo vicino più prossimo alla destinazione e, in caso positivo, invia il dato a tale nodo. In caso contrario, il vicino a cui inoltrare il pacchetto è selezionato in accordo con il costo appreso. Nel secondo scenario invece, l'informazione è inoltrata seguendo in maniera ricorsiva il procedimento appena descritto, suddividendo però la regione in quadranti e inviando il pacchetto ad un nodo in ciascun quadrante, fino alla formazione di aree con un solo nodo.

7.5 Il laboratorio di sperimentazione

L'architettura del sistema di laboratorio ipotizzata, prevede che ciascun ambiente, tra quelli sottoposti a monitoraggio e gestione, sia coperto da una rete di nodi sensori ed attuatori wireless (RoomNet). La RoomNet è l'ambiente monitorato e dove è presente la WSN, cioè dove sono installati i sensori e gli attuatori.

La tecnologia considerata per la rete di nodi sensori wireless è ZigBee: sono economici, consumano poco, sono adatti a un refitting non invasivo della struttura e ZigBee offre meccanismi versatili per l'estensione delle funzionalità. Le misurazioni rilevate dai nodi sensori all'interno di una RoomNet sono raccolte da uno speciale nodo che fa capo alla RoomNet stessa (Sink). Questo è, a tutti gli effetti, un calcolatore di tipo "x86", ed è dotato, oltre che di un'interfaccia di rete 802.15.4 per l'accesso alla rete ZigBee, anche di un'interfaccia di rete (cablata ove possibile, o wireless dove no) per l'accesso ad una rete IP. Il Sink si preoccupa di propagare i dati raccolti dai nodi sensori della RoomNet sulla rete IP e fornisce inoltre la possibilità di controllare gli attuatori disponibili all'interno delle RoomNet. Questo sarà possibile grazie a un Middleware funzionante a bordo del Sink, che si occuperà della propagazione dei dati provenienti dai nodi sensori e del controllo degli attuatori. La Figura 3 illustra l'architettura generale del sistema.

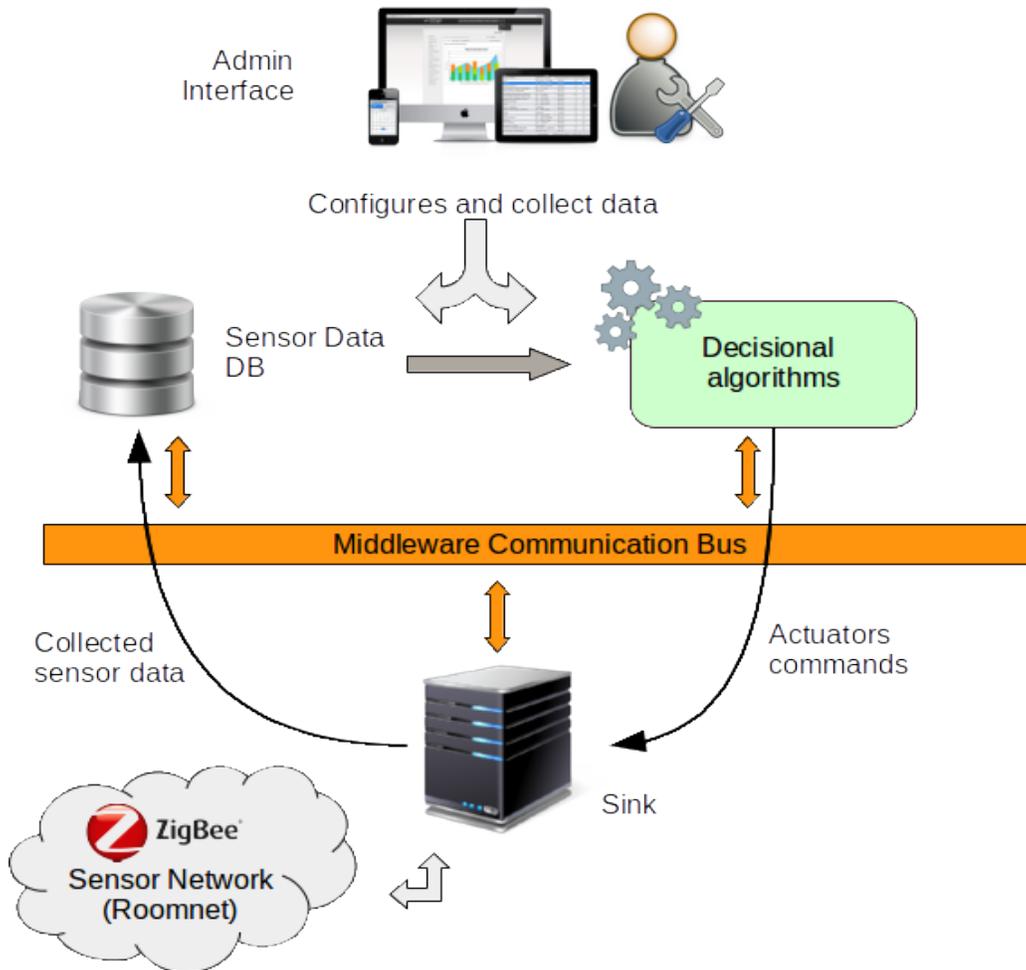


Figura 3: Architettura generale del sistema

I dati misurati dalle singole RoomNet vengono pubblicati su un database remoto, grazie al supporto del canale di comunicazione offerto dal Middleware.

Processi decisionali interrogano il middleware, in modo da poter prendere decisioni circa l'ottimizzazione energetica dell'ambiente sotto monitoraggio, mediante controllo degli attuatori. Gli amministratori del sistema possono visualizzare i dati collezionati e configurare gli algoritmi decisionali mediante apposite interfacce grafiche.

7.6 Il Middleware

7.6.1 Funzionalità

Il Middleware è una piattaforma di comunicazione orientata alla gestione di sensori e attuatori in ambiente distribuito che offre la possibilità di pubblicare dati forniti dai sensori su un canale di comunicazione, permettendo inoltre l'invio di comandi a degli attuatori.

Il Middleware offre le seguenti funzionalità:

- Formalismo per la descrizione di un sensore/attuatore indipendente dalla tecnologia di sensori utilizzata.
- Strumenti per la pubblicazione di sensori/attuatori (services)
- Strumenti per la ricerca di sensori/attuatori pubblicati
- Strumenti per la pubblicazione di dati rilevati da sensori
- Strumenti di supporto all'invio di comandi verso gli attuatori
- Policy per il controllo di visibilità dei dati in transito sul bus
- Cifratura dei messaggi in transito.

Il Middleware offre quindi una piattaforma uniforme per l'integrazione di reti di sensori eterogenee seguendo alcuni obiettivi:

- Semplicità: Il Middleware offre un set di astrazioni minimali per la rappresentazione dei sensori e per l'accesso alle funzionalità del sistema (Middleware API). Il layer software necessario per l'accesso al bus di comunicazione è estremamente ridotto.
- Scalabilità: Il Middleware fa affidamento a sistemi per lo scambio di messaggi (MoM - Message oriented Middleware), i quali possono essere configurati per operare in scenari con un elevato numero di produttori e consumatori di messaggi.
- Affidabilità: Il sistema offre meccanismi di buffering e gestione automatica di malfunzionamenti di rete che consentono di ridurre le perdite di messaggi.

- Sicurezza: Le comunicazioni possono essere cifrate al fine di garantire la riservatezza dei dati in transito. Il protocollo di comunicazione prevede inoltre autenticazione e autorizzazione.

7.6.2 Architettura del Middleware

Il sistema Middleware si compone di un sistema publish/subscribe per lo scambio di messaggi e di uno strato software.

Seguendo la direzione bottom-up, il sistema si appoggia a un Message-Oriented Middleware (MOM) basato su protocollo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). MQTT è un protocollo publish/subscribe estremamente leggero utilizzato in applicazioni di ambito M2M (machine-to-machine communication) e IoT (Internet of Things). In una architettura publish/subscribe si prevede la presenza di almeno un broker di messaggistica (Message Broker), un componente software che media la comunicazione tra più applicazioni, disaccoppiandole tra loro.

Il Middleware sfrutta il protocollo MQTT e il paradigma di comunicazione publish/subscribe costruendo 3 tipologie di bus di comunicazione per tre diversi tipi di messaggi:

- Service Bus: messaggi relativi alla disponibilità di sensori/attuatori e loro relative caratteristiche.
- Context Bus: messaggi relativi a comunicazioni generate da sensori/attuatori.
- Control Bus: messaggi che comandano funzionalità offerte da sensori/attuatori, disponibili.

Oltre a questa divisione, il Middleware divide i bus secondo ambiti di visibilità (scope) in modo tale da poter garantire policy di accesso ai bus gestiti dal broker ai vari client. In Figura 4 è raffigurata la configurazione del sistema dove i Sink di riferimento per diversi ambienti hanno accesso a bus dedicati, mentre un nodo di backend è configurato per poter accedere a tutti i bus al fine di poter memorizzare i dati su un DB. E' possibile imporre limitazioni di accesso ai bus tramite configurazione del message broker a seconda della implementazione scelta (e.g.: Mosquitto).

Il Middleware costruisce su questo layer ulteriori funzionalità fornendo un'interfaccia di alto livello (Communication API). Questa nasconde la presenza di un sistema a scambio di messaggi fornendo un formalismo per la descrizione di sensori/attuatori indipendente dalla tecnologia e offrendo una API per la pubblicazione di dati in arrivo dai sensori, il discovery di servizi (sensori e attuatori) e l'invocazione di metodi remoti di attuatori.

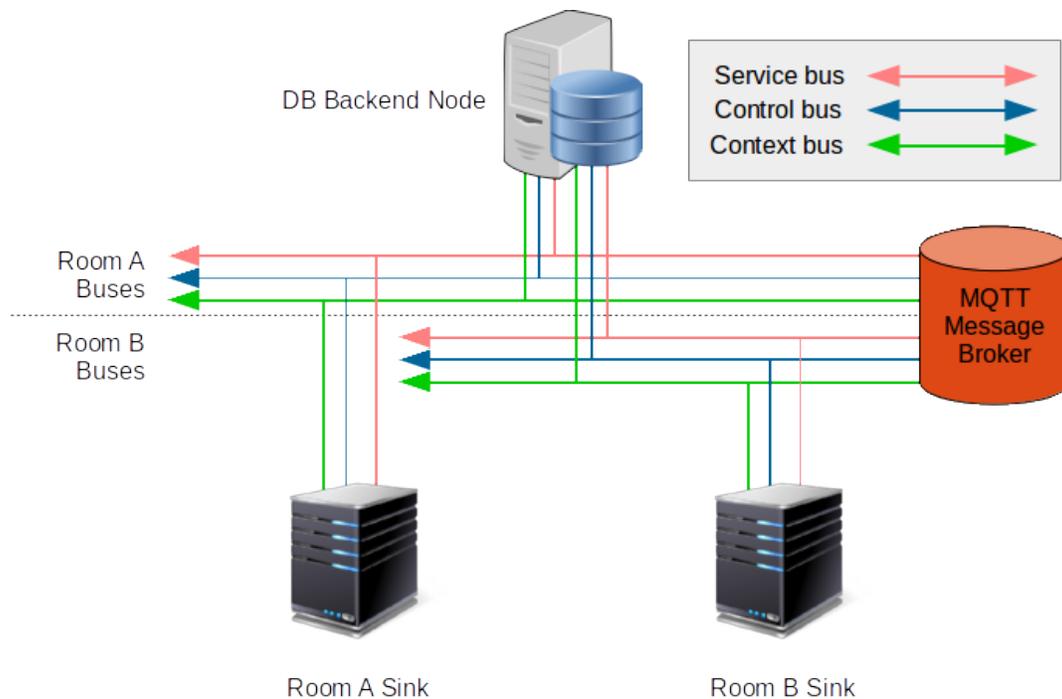


Figura 4: Separazione dei Bus di comunicazione

Riguardo le applicazioni che utilizzano le Communication API, queste si dividono in due macro categorie:

- Produttori (services, producers)
 - o Adattatore di tecnologia di rete di sensori presente sul Sink che annuncia la disponibilità di sensori e attuatori, pubblica periodicamente i dati relativi ai sensori e inoltra i comandi in ingresso sul control bus verso gli attuatori.
 - o Applicazioni che, elaborando dati in transito sul bus o provenienti da altre fonti, producono nuovi output.
- Consumatori (consumers)
 - o Sensor data recorder: modulo software che registra su DB i dati in ingresso dai sensori.
 - o Sistemi di allarme: moduli software che reagiscono in tempo reale in presenza di un determinato stato del sistema.
 - o Interfacce grafiche: Applicazione web che mantiene solo gli ultimi dati ricevuti dai sensori e mostra in tempo reale lo stato della infrastruttura.
 - o Sistemi di controllo: moduli software che reagiscono in base alle rilevazioni dei sensori inviando comandi verso determinati attuatori.

8 Valutazione della rete di sensori

Lo sviluppo di un sistema di acquisizione dati wireless comporta il raggiungimento di alcuni obiettivi prestazionali. In primo luogo il sistema deve realizzare un obiettivo di affidabilità minima. Nel caso per esempio delle applicazioni industriali, l'obiettivo consiste tipicamente nel ricevere almeno il 99,9% dei dati generati perché i dati mancanti possono innescare costosi stati di allarme. Il sistema deve poi supportare una determinata velocità di trasmissione, cioè un certo numero di pacchetti di dati al secondo. Questi pacchetti servono solo se ricevuti entro un periodo di latenza massimo. Molti processi si basano su aggiornamenti di dati nuovi; nel caso del controllo, se i dati sono obsoleti, non servono a nulla. Quarto, molti sistemi devono operare in ambienti difficili che comportano ampi range di temperatura e limitazioni alla sicurezza intrinseca. Solo le soluzioni che soddisfano questi requisiti sono considerate adatte per una successiva valutazione.

I criteri principali di cui tenere conto quando si esaminano soluzioni che soddisfano tali requisiti sono il costo di possesso e la flessibilità. Il costo di possesso comprende diversi aspetti: sviluppo del prodotto, installazione, hardware e fornitura di energia per tutta la durata dell'installazione. Le tecnologie wireless hanno comportato una netta riduzione dei costi di installazione rispetto alle soluzioni cablate, ma i dispositivi wireless a batteria possono richiedere la sostituzione delle batterie nel corso del ciclo di vita della rete. Esiste inoltre un trade-off tra la costruzione di una rete con un numero limitato di dispositivi ad alta potenza per ridurre il costo dell'hardware e l'uso di un numero elevato di dispositivi a basso consumo. Nel caso dei dispositivi alimentati da celle a recupero energetico (es. solari, termoelettriche), le dimensioni del condensatore possono determinare una parte considerevole del costo. Le soluzioni con una pianificazione deterministica, come il TDMA (Time-Division Multiple Access), possono contribuire a separare il più possibile eventi ad alta corrente in modo da ridurre i requisiti relativi alle dimensioni del condensatore.

Essendo le condizioni di utilizzo finale imprevedibili, occorre progettare reti che siano flessibili.

Le reti devono poter avere grandi o piccole quantità di sensori e una densità bassa o alta. Per garantire che resistano nei vari ambienti wireless, l'approvvigionamento delle risorse deve fare in modo che i dispositivi possano comunicare in modo affidabile con modeste interferenze e che le reti sopravvivano alla perdita di singoli dispositivi. Altre risorse, tra cui più collegamenti wireless, più nodi vicini per ciascun dispositivo o una maggiore amplificazione del segnale, migliorano l'affidabilità e la latenza. Tutte queste aggiunte comportano costi energetici maggiori che possono essere ridotti al minimo con l'allocazione dinamica.

Le soluzioni basate su standard garantiscono l'immunità da improvvise variazioni della supply chain di un componente di un fornitore e l'assicurazione che la comunità ha accettato i principi base del funzionamento (es. architettura di sicurezza).

Il canale wireless non è affidabile in natura e numerosi fenomeni possono impedire a un pacchetto trasmesso di raggiungere il ricevitore. Uno di questi fenomeni è l'interferenza. Due trasmettitori

indipendenti che, trasmettendo sullo stesso canale, provocano la sovrapposizione dei rispettivi segnali, possono rovinarli nella radio del ricevitore. Il trasmettitore deve così ripetere la trasmissione, con ulteriore spreco di tempo ed energia.

L'interferenza può provenire dalla stessa rete se la tecnologia di accesso al mezzo sottostante non pianifica una comunicazione 'contention-free'. La situazione diventa molto problematica se i due trasmettitori possono sentire il ricevitore senza sentirsi tra loro (detto anche "problema del terminale nascosto"), per cui occorrono meccanismi di backoff e conferma per risolvere eventuali collisioni.

L'interferenza può provenire anche da un'altra rete che opera nello stesso spazio radio oppure da una tecnologia radio diversa che usa la stessa banda di frequenza. Quest'ultimo tipo, denominata anche interferenza "esterna", è presente soprattutto nelle bande senza licenza, tra cui la ISM (Instrumentation, Scientific and Medical) a 2.400-2.485GHz, che sono piene di Wi-Fi, Bluetooth e 802.15.4.

Come suggerito in precedenza, una tecnologia adatta per il risolvere il problema delle WSN è la IEEE 802.15.4. I livelli PHY ad ampio spettro della banda 2.4GHz garantiscono l'immunità dal rumore, una caratteristica molto importante per un dispositivo a basso consumo progettato per operare su una banda potenzialmente congestionata. Lo standard definisce anche un livello MAC packet-based (o frame-based) affidabile, acknowledged, con crittografia e autenticazione opzionali.

Questa soluzione costituisce la base di molti protocolli basati su standard, incluso ZigBee, che se ne serve per formare reti a canale singolo non sincronizzate, e WirelessHART [41], che la usa per formare reti multicanale sincronizzate.

Il protocollo WirelessHART, sviluppato in collaborazione con Dust Networks di Linear, ha un PHY 802.15.4 da 2,4GHz e un livello di collegamento basato su 802.15.4 che aggiunge sincronizzazione, channel hopping, priorità e autenticazione time-based per il MAC 802.15.4 standard. Ha un livello rete che offre funzioni di routing e sicurezza end-to-end e un sottile livello trasporto mesh inaffidabile/affidabile. Lo standard WirelessHART specifica la regolazione del time slot, il modo in cui i dispositivi mantengono la sincronizzazione e programmano le possibilità di comunicazione tempo/canale dividendo il tempo in possibilità di comunicazione intervallate (time slot) su superframe ripetitivi. Il protocollo è stato creato per consentire la perfetta integrazione tra dispositivi wireless e installazioni HART cablate esistenti, molto diffuse per il monitoraggio dei processi industriali e le applicazioni di controllo.

Un'altra fase di lavoro sul campo, sarà la valutazione dei consumi dei sensori installati, presso il laboratorio di sperimentazione.

Le problematiche di valutazione possono essere divise in due blocchi:

- Misure delle prestazioni del sistema in condizioni di normale utilizzo. In questo caso si procede alla valutazione, della configurazione dei parametri del sistema. Ci si dovrà concentrare soprattutto sulle tempistiche (tempi di ciclo, latenze degli allarmi, ecc).

- Misura delle prestazioni in presenza di disturbi sia in banda che fuori banda e dei consumi energetici della rete di sensori.

8.1 Strumenti di utilizzo

8.1.1 RF4CE-EK

Un primo prodotto di valutazione è il un kit di valutazione Atmel, RF4CE-EK. Esso fornisce una completa piattaforma hardware-software sia per lo stack ZigBee e, in particolare, è munito degli standard ZRC e ZLL [42].

Il kit contiene:

- Atmel RCB128RFA1 Radio Controller Board (RCB)
- 1x Atmel RCB Sensor Terminal Board (STB) • 1x Atmel RCB Key Remote Control Board (K_RC)
- 1x Cavo RCB-BB RS232 • 1x Cavo USB
- 2x Antenne a 2.4 GHz
- 4x Batterie AAA



Figura 5: Kit di valutazione Atmel RF4CE

8.1.4 Radio Controller Board

Questo dispositivo è un vero e proprio nodo ZigBee. Ha le seguenti caratteristiche:

- Transceiver single-chip con antenna a 2.4 GHz
- Microcontrollore AVR ATmega128RFA1 a bordo
- Alimentato a batterie (2x AAA)
- Munito di connettore standard 2x30 pin
- Indicatori LED
- Funge da nodo ZLL
 - Lighting Device
 - Stand-alone (effetto visivo: led a bordo)
 - Montato su Key Remote Control Board (effetto visivo: display LCD)
 - Controller
 - Montato su Key Remote Control Board



Figura 6: Atmel RCB128RFA1, vista frontale e vista dorsale

8.1.5 Sensor Terminal Board

Scheda usata per programmare il nodo RCB, aggiornare il firmware al suo interno, eseguire sessioni di debug e connetterlo al mondo esterno:

- •Interfaccia per RCB
 - Connettore standard 2x30 pin
 - Connettore JTAG per la programmazione di RCB
 - Altri connettori



Figura 7: Sensor Terminal Board + RCB

8.1.6 Sniffer

Per monitorare i pacchetti che i nodi di una rete wireless si scambiano, è possibile utilizzare un apposito strumento chiamato Sniffer. Questo oggetto è anche esso un nodo ed composto da una semplice antenna unicamente ricevente e poca altra circuiteria annessa. Esso si connette al PC tipicamente attraverso porta USB e si appoggia a software dedicati, a seconda del tipo di comunicazione RF che si vuole catturare.

Esso permette di visualizzare a video la successione dei pacchetti di informazione captati rendendo possibile lo studio dell'effettiva attività radio che avviene nella rete, identificando le varie tipologie di pacchetto ed i campi da cui sono composti, come ad esempio il campo in cui risiede l'indirizzo del nodo sorgente e quello in cui si trova l'indirizzo del destinatario.

Un esempio di Sniffer è il CC2531 USB dongle, prodotto da Texas Instruments.



Figura 8: CC2531 USB dongle, Texas Instruments

8.2 Valutazione dei consumi energetici

Valutare i consumi energetici di un System-on-Chip (SoC) durante le sue fasi di funzionamento è molto complicato, soprattutto se si tratta di stimare l'assorbimento di corrente di singoli eventi, quali invio e ricezione di uno o più byte, conversione analogico-digitale di segnali, lettura da sensori digitali etc. Gli strumenti di misura, per questo particolare scenario, sono in generale molto costosi poiché sono dotati di circuiteria di precisione, in quanto in grado di campionare segnali con transizioni brusche ed effettuare dei calcoli. Per questo motivo, occorrerà fare più simulazioni di consumo, in certe ipotesi di funzionamento predefinite, basandoci su dati presenti nei datasheets dei vari dispositivi, e infine alcune misurazioni reali.

8.3 I consumi dei nodi

In questa fase, si analizzeranno i consumi energetici dei nodi della rete ZigBee durante il loro consueto funzionamento, in diverse modalità di configurazione, atti alla misurazione dei dati di temperatura e umidità relativa. Lo scopo di queste misurazioni sarà quello di valutare se tali nodi possano essere alimentati da una fonte energetica di recupero (harvesting).

Per prima cosa, occorre valutare l'assorbimento di corrente di un nodo in trasmissione continua a diverse potenze e uno in ricezione continua.

Queste quantità si dovranno ottenere in laboratorio considerando il consumo dell'intera piattaforma (e quindi non del solo chip) in modalità di debug. Per queste misurazioni, è possibile per esempio utilizzare un tool per test radio della Texas Instruments, SmartRF Studio, che permette il controllo di dispositivi connessi, attraverso interfaccia di debug jtag. Grazie a SmartRF Studio, è possibile programmare un dispositivo in trasmissione continua, impostando una potenza ed un payload arbitrario e allo stesso modo, un dispositivo in ricezione continua, andando a valutare pacchetti persi, qualità del link etc etc. Si confronteranno poi i dati ottenuti con i consumi indicati dal costruttore.

Un nodo ZigBee può essere configurato come ZR o come ZED, in base ai compiti che esso deve svolgere all'interno della rete. Un ZR all'interno della rete è capace di instradare i messaggi nella direzione del destinatario e di supportare le associazioni con gli ZED. Gli ZED sono imparentati con un ZR (rapporto padre-figlio) e tipicamente sono programmati per stare in modalità sleep la maggior parte del tempo. Periodicamente, il dispositivo si "sveglia" chiedendo, attraverso un messaggio di poll, allo ZR associato (padre) se ci sono messaggi per lui.

Allo stesso tempo, è possibile impostare un ulteriore timer per la lettura dai sensori ambientali, quali temperatura e umidità relativa. La tabella 5 ne mostra le caratteristiche principali.

Power Mode	High-Frequency Oscillator	Low-Frequency Oscillator	Voltage Regulator (Digital)
Configuration	A 32-MHz XOSC B 16-MHz RCOSC	C 32-kHz XOSC D 32-kHz RCOSC	
Active / idle mode	A or B	C or D	ON
PM1	None	C or D	ON
PM2	None	C or D	OFF
PM3	None	None	OFF

Figura 9: ZED, caratteristiche principali

8.3.1 Configurazione ZED – ZC

Il ZC ha il compito di creare la rete ZigBee ed è sempre alimentato tramite rete elettrica, data la mole di lavoro a cui è sottoposto.

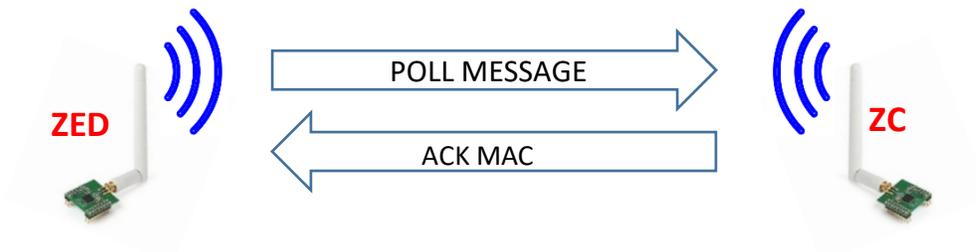


Figura 10: Sequenza di POLL

A regime, è ipotizzabile un funzionamento del ZED ed uno scambio di messaggi tra ZED e ZC come mostrato nella tabella seguente.

<i>Periodo</i>	<i>Operazione</i>
Ogni POLL_PERIOD secondi	Sequenza di Figura 2
Ogni DATA_PERIOD minuti	Letture dal sensore DHT22 e sequenza di Figura 3
Restante periodo di tempo	Modalità PM2

Figura 11: Sequenza delle operazioni

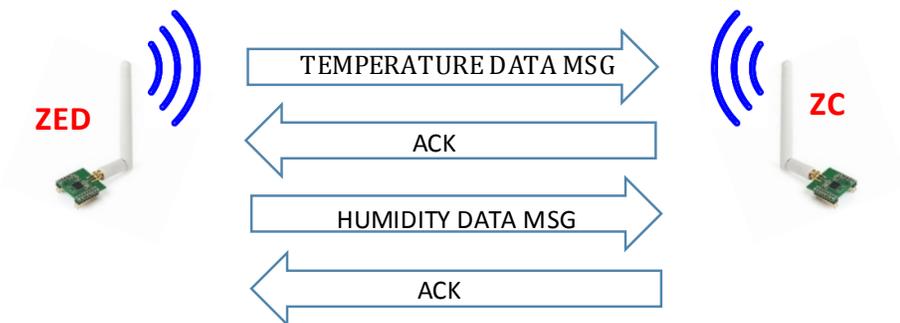


Figura 12: Sequenza di dati

È possibile, dunque, andare a valutare il consumo energetico del ZED nel tempo al variare dei due parametri sopra indicati, ovvero il POLL_PERIOD ed il DATA_PERIOD.

8.4 Altre tecnologie di trasporto

In questo paragrafo, diamo una panoramica non esaustiva delle tecnologie di comunicazione wireless presenti sul mercato, valutandone principalmente i consumi energetici.

Protocol	Zigbee	Z-Wave (Zensys Corp)	EnOcean	UWB	Bluetooth	Insteon (SmartLabs, Inc)	Wavenis (Coronis System)	Wi-Fi	6LoWPAN
IEEE Standard	802.15.4	-	-	802.15.3a*	802.15.1	-	-	802.11a/b/g	802.15.4
Frequency Band	2.4 GHz, 915 MHz, 868 MHz	868/908MHz, 2.4 GHz (400 series only)	868 MHz	3.1-10.6 GHz	2.4 GHz	904 MHz	433 /868/ 915	2.4 GHz, 5 GHz	2.4 GHz, 915 MHz, 868 MHz
Data Rate	20/40/250 Kb/s	9.6Kbps/40Kbps, 200 kb/s	125 kbit/s	110 Mb/s	1 Mb/s	38.4 Kb/s	4.8/19.2/100	54 Mb/s	20/40/250 Kb/s
Modulation	BPSK/BPSK/O-QPSK	FSK /GFSK	ASK	BPSK, QPSK	GFSK	FSK	GFSK/PSK	B/QPSK, COFDM, QAM	BPSK/BPSK/O-QPSK
Spreading	DSSS	No	No	DS-UWB, MB-OFDM	FHSS	No	FHSS	DSSS, CCK, OFDM	DSSS
Communication Range(m)	10-100	30 (in) 100 (out)	30 (in) 300(out)	10	10	45 (out)	200 (in) 1000 (out)	100	10-100
Security	AES	AES-128	Basic	AES	E0 Stream AES-128	Rolling codes, public-key	3 DES 128AES	RC4 Stream / AES Block	AES
Error Control/Reliability	16-bit CRC, ACK, CSMA-CA	8-bit CRC, ACK, CSMA-CA	-	32-bit CRC CSMA-CA	16-bit CRC	8-bit checksums	BCH (32,21) FEC	32-bit CRC	16-bit CRC, CSMA-CA, ACK
Network Size	64000	232	2 ³²	8	8	256	NA	2007	2 ⁶⁴
Internet connection	Gateway Required	Gateway Required	Gateway Required	Gateway Required	Gateway Required	Gateway Required	Gateway Required	Gateway Required	Gateway NOT required
Logistic	Standard	Proprietary	Proprietary	Standard	Standard	Proprietary	Proprietary	Standard	Standard

Figura 13: Comparazione delle principali tecnologie wir

In Tabella 7, sono mostrate le caratteristiche principali delle tecnologie prese in considerazione, mentre in Tabella 8 sono mostrati i consumi energetici di alcuni chip di riferimento di ciascuna tecnologia.

Nel contesto di sensori alimentati da fonti energetiche di recupero, l'assorbimento di corrente e la conseguente dissipazione di potenza dei dispositivi, ovvero unità di calcolo, moduli radio e trasduttori, assume un ruolo fondamentale.

Technology	Manufacturer	Part Number	Supply Voltage (V)	TX current (mA)	RX current (mA)	TX power (mW)	RX power (mW)
Bluetooth	TI	CC2540 SoC	3	24	19.6	72	58.8
Bluetooth	Cambridge Silicon Radio	Bluecore2	1.8	57	47	102.6	84.6
Zwave	Zensys	ZW0201	3	36	23	108	69
UWB	Freescale	XS112	3.3	227	227	749.1	749.1
WiFi	Conexant	CX53112	3.3	219	215	722.7	709.5
EnOcean	EnOcean	Dolphin EO3000I	2.5	0	23	Not given	57.5
Wavenis	Coronis Systems	Wavenis SoC	3	Not given	17	Not given	51

Figura 14: Consumi energetici dei chip di riferimento

Si nota immediatamente che alcune tecnologie, quali Wi-Fi ed UWB, si rendono particolarmente adatte per altre applicazioni, come ad esempio la trasmissione e ricezione di flussi audio-video, grazie ad un elevato data rate a fronte di un altrettanto elevato consumo energetico.

Tutte le altre tecnologie, invece, presentano degli assorbimenti comparabili a quanto misurato nel capitolo precedente, che le rendono particolarmente adeguate ad essere impiegate in questo contesto. Infatti, i sensori devono poter prelevare grandezze fisiche ambientali, quali densità di rumore, temperatura, umidità ecc., a frequenze tendenzialmente molto basse, essendo dati che variano molto lentamente nel tempo. L'elemento chiave dei nodi wireless è il microcontrollore, elemento centrale dell'intero sensore, che deve possedere abbastanza potenza computazionale da riuscire a gestire l'intera comunicazione. MCU a 8 bit con elaborazione limitata sono al momento i più diffusi, ma stanno uscendo sul mercato sempre più microprocessori a 16/32 bit con potenze di calcolo di molto superiori a parità di consumi.

Riferimenti

- [1] Fanger P.O., Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering; Copenhagen Danish Technical Press, 1970.
- [2] Fanger P.O, Thermal Environment- Human Requirements, The Environmentalist, Volume 6, Number 4 (1986) pp. 275-278 .
- [3] UNI EN ISO 7730:2006, Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale, Ente nazionale di Unificazione Italiano, Milano.
- [4] Taleghani M., Tenpierik M., Kurvers S., van den Dobbelen A., A review into thermal comfort in buildings, Renewable and Sustainable Energy Reviews 26(2013) pp. 201–215.
- [5] Djongyjang N., Tchinda R., Donatien N., Thermal comfort: A review paper, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) pp. 2626-2640.
- [6] Christensen N.K, Olesen B.W., Standards for moderate thermal environments, Appl. Ergon. 16 (2) (1985) pp. 137-41.
- [7] de Dear R.J., Akimoto T, Arens E.A., Brager G., Candido C., Cheong K. W. D., Li B., Nishihara N., Sekhar S. C., Tanabe S., Toftum J., Zhang H., Zhu Y., Progress in thermal comfort research over the last twenty years, Indoor Air 23 (2013) pp. 442–461.
- [8] Yang L., Yan H., Lam J.C., Thermal comfort and building energy consumption implications –A review, Applied Energy 115 (2014) pp. 164–173
- [9] Griego D., Krarti M., Hernández-Guerrero A., Optimization of energy efficiency and thermal comfort measures for residential buildings in Salamanca, Mexico, Energy and Buildings 54 (2012) pp. 540–549.
- [10] Shaikh P.H., Bin Mohd. Nor N. , Nallagownden P., Elamvazuthi I., Ibrahim T., A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings, Renewable and Sustainable Energy Reviews 34 (2014) pp. 409–429
- [11] Veselý M., Zeiler W., Personalized conditioning and its impact on thermal comfort and energy performance – A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 34 (2014) pp. 401–408]
- [12] C. Buratti, Dispense del Corso di tecnica del controllo ambientale, Università di Perugia.
- [13] [Dave Evans. 2011 Cisco White Paper. Tutto cambierà con la prossima era di Internet]
- [14] L. Necchi. Architetture per “Reti di Sensori Wireless”. Tesi di dottorato 2007. Politecnico di Torino
- [15] www.cubitlab.com
- [16] [<http://elettronica-plus.it/sensori-mems-per-applicazioni-industriali/>]

- [17] W. Su, O.B. Akan e E. Cayirci. Wireless sensor networks, capitolo Communication protocols for sensor networks, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [18] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam e E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey, Computer Networks, numero 38, 393-442, 2002.
- [19] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park e M. Srivastava. Energy aware wireless microsensor networks. IEEE Signal Processing Magazine, numero 19, 40-50, 2002.
- [20] P. Padhy, K. Martinez, A. Riddoch, H. Ong, e J. Hart. Glacial environment monitoring using sensor networks, Proceedings of the REALWSN05 Workshop on Real-World Wireless Sensor Networks.
- [21] The Pima County Regional Flood Control District. Automated Local Evaluation in Real Time (ALERT), Website, <http://www.rfcd.pima.gov/wrd/alertsys/>.
- [22] Diamond, Scott M., and Marion G. Ceruti. "Application of wireless sensor network to military information integration." Industrial Informatics, 2007 5th IEEE International Conference on. Vol. 1. IEEE, 2007.
- [23] Bekmezci, Ilker, and Fatih Alagöz. "Energy efficient, delay sensitive, fault tolerant wireless sensor network for military monitoring." International Journal of Distributed Sensor Networks 5.6 (2009): 729-747.
- [24] Ren, Hongliang, MQ-H. Meng, and Xijun Chen. "Physiological information acquisition through wireless biomedical sensor networks." Information Acquisition, 2005 IEEE International Conference on. IEEE, 2005.
- [25] Otto, Chris, et al. "System architecture of a wireless body area sensor network for ubiquitous health monitoring." Journal of Mobile Multimedia 1.4 (2006): 307-326.
- [26] P. Kulkarni, D. Ganesan, P. Shenoy, Q. Lu. SensEye: a multi-tier camera sensor network, Proc. of ACM Multimedia, Singapore, 2005.
- [27] Gill, Khusvinder, et al. "A zigbee-based home automation system." Consumer Electronics, IEEE Transactions on 55.2 (2009): 422-430.
- [28] International Standard Organization. ISO/IEC 7498-1: 1994(e) information processing systems - OSI reference model, Technical report, International Organization for Standardization, 1994.
- [29] B. Kechar, A. Louazani, L. Sekhri e M.F. Khelfi. Energy-Efficient Cross- Layer MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, Department of Computer Science, Faculty of Science, University of Oran Es-Senia, BP. 1524 Oran, Algeria, 2008.
- [30] IEEE 802Working Group. IEEE Std 802.15.4-2006, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low- Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006. (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003).

- [31] M. Lee, Y. Liu, C. Zhu, H.R. Shao e H. Jeon. Proposal for post beacon delay in 802.15.4, In IEEE P802.14 WG for WPANs, 2004.
- [32] M. Lee, J. Zhang, Y. Liu, H. Dai e H.R. Shao. Combined beacon scheduling proposal to 802.15.4, In IEEE P802.14 WG for WPANs, 2004.
- [33] W. Ye, J. Heidemann e D. Estrin. Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Syensor Networks, IEEE/ACM Transactions on Networking, 493-506, 2004.
- [34] T. van Dam e K. Langendoen. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems, 171-180, 2003.
- [35] J. Polastre, J. Hill e D. Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks, Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, 95-107, 2004.
- [36] W. Heinzelman, A. Chandrakasan e H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, System Sciences, Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference, 2000.
- [37] Wendi Rabiner Heinzelman, Joanna Kulik, and Hari Balakrishnan. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking, 174-185. ACM, 1999.
- [38] Chalermek Intanagonwiwat, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking, 56-67. ACM, 2000.
- [39] Stephanie Lindsey and Cauligi S. Raghavendra. Pegasis: Power-efficient gathering in sensor information systems. In Aerospace conference proceedings, 2002. IEEE, volume 3.
- [40] Yan Yu, Ramesh Govindan, and Deborah Estrin. Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. Technical report, Citeseer, 2001.
- [41] Hassan, Sabo Miya, et al. "Application of wireless technology for control: A WirelessHART perspective." *Procedia Computer Science* 105 (2017): 240-247
- [42] <http://www.atmel.com/tools/rf4ce-ek.aspx>