

Reti di sensori: dalla teoria alla pratica

ANDREA ZANELLA
MICHELE ZORZI

Le reti radio di sensori costituiscono una famiglia molto vasta di sistemi che possono differenziarsi in numerosi aspetti, pur presentando alcune similarità nelle caratteristiche principali. L'elemento di base di tali reti è il "nodo sensore," termine generico con cui si indica un insieme di dispositivi estremamente versatili e dalle dimensioni generalmente ridotte, studiati principalmente allo scopo di permettere l'osservazione del mondo fisico. L'interconnessione di tali nodi per mezzo di tecnologie radio, unitamente allo sviluppo di un'architettura protocollare che consenta la cooperazione tra le diverse entità, amplifica esponenzialmente le capacità dei singoli elementi e apre la strada ad un insieme vastissimo di nuove applicazioni. Tuttavia, la realizzazione di questi scenari richiede la risoluzione di numerosi problemi che sono oggetto di studio da parte di molte università ed enti di ricerca di tutto il mondo.

In questo articolo si presentano le potenzialità e le caratteristiche di una rete di sensori, descrivendo alcuni degli scenari applicativi che potrebbero essere realizzati per mezzo di questo nuovo paradigma di comunicazione. Per dare concretezza alla trattazione, quindi, si descrivono in maggior dettaglio la piattaforma sperimentale per reti di sensori in uso al gruppo SIGNET e si discutono brevemente alcuni dei primi risultati ottenuti per mezzo di tale test-bed. La trattazione è accompagnata da alcuni riquadri di approfondimento che offrono maggiori dettagli su alcuni degli argomenti toccati nell'articolo.

BOZZA
13/4/06

1. Introduzione

All'Università di Padova, le tematiche relative alle reti radio e, in particolare, alle reti di sensori sono da anni oggetto di studio dei ricercatori del laboratorio *SIGNET* (*Special Interest Group on NETworking*), presso il *Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DEI)*. L'attività di ricerca si inserisce nel contesto di diversi progetti Europei sulle reti di sensori e su tematiche affini, consentendo a SIGNET di mantenere contatto con le più importanti realtà europee (ed extra europee) sul settore. Recentemente, inoltre, il laboratorio SIGNET si è dotato di una piattaforma sperimentale per nodi sensore e ha dato inizio all'implementazione e sperimentazione "sul campo" di soluzioni e servizi per

reti di sensori. Questa attività sperimentale contribuisce a rafforzare le competenze del gruppo sul settore, arricchendo le conoscenze teoriche con la sensibilità derivante dall'esperienza pratica acquisita "sul campo".

Entrando nel tema, una rete radio di sensori, o *WSN* (*Wireless Sensor Network*) è un sistema complesso che nasce dalla cooperazione tra diversi oggetti elementari, detti nodo sensore (**figura 1**).

Si tratta, nella sostanza, di veri e propri *sistemi embedded*, dispositivi elettronici in grado di svolgere in modo autonomo un certo insieme di operazioni più o meno complesse, di interagire con l'ambiente circostante e di cooperare tra loro per mezzo di opportune interfacce di comunicazione.



FIGURA 1 ► Alcune tipologie di nodo per reti di sensori.

Ed è proprio l'interconnessione di questi oggetti in una WSN che amplia incredibilmente le potenzialità del sistema e apre la strada alla realizzazione di servizi avanzati e innovativi a partire dalle funzionalità elementari fornite dai nodi sensori.

I possibili campi di impiego delle WSN sono numerosi ed eterogenei. Premesso che in questo articolo non si tratterà dettagliatamente dell'applicazione delle WSN al settore delle telecomunicazioni, eccezion fatta per la citazione alla tecnologia ZigBee e alle implicazioni di comunicazione che si hanno negli *Smart Environments* dove sono appunto impiegati dei sensori, è utile precisare che ci sono molti contesti in cui le WSN trovano impiego. Ad esempio nel contesto della tutela ambientale, le WSN possono essere utilizzate per rivelare tempestivamente incendi boschivi, oppure per monitorare l'inquinamento di falde acquifere e laghi o, ancora, per controllare aree a rischio, come discariche, impianti industriali e chimici, centrali nucleari. Un altro loro possibile impiego è nel campo della domotica, dove si possono sfruttare la WSN per realizzare un'interazione tra ambiente e persona, facendo in modo che l'ambiente reagisca e si adatti alla presenza e alle esigenze dell'utente in modo automatico. Scenari futuristici, inoltre, prevedono l'utilizzo delle WSN in ambito medico, attraverso l'impianto nell'organismo di minuscoli nodi sensore in grado di monitorare i parametri vitali della persona e somministrare la terapia farmacologica in modo autonomo, quando necessario.

Le potenzialità di questo nuovo paradigma di comunicazione, unitamente alle problematiche ad esso connesse, sono da alcuni anni oggetto di studio nella comunità scientifica internazionale. La Comunità Europea ha recepito, con qualche ritardo, l'importanza di queste nuove tecnologie e ha dato impulso allo sviluppo del settore finanziando diversi progetti di ricerca, a cui partecipano grosse aziende operanti nel settore dell'ICT (*Information and Communication Technology*) e alcune tra le maggiori università europee.

L'Università di Padova, in particolare, ha preso parte a diversi progetti europei per mezzo dei ricercatori del gruppo SIGNET [1] afferente al DEI. L'attività di ricerca riguarda prevalentemente lo sviluppo e l'analisi di protocolli per la creazione e la gestione di WSN, spaziando dalle strategie di accesso al mezzo e instradamento, alle tecniche di elaborazione dell'informazione (*data fusion*), ai protocolli adattabili al contesto (*context-aware protocol*). Recentemente, il gruppo ha acquisito diverse decine di nodi sensore della famiglia EyesIFX v2, prodotti dalla Infineon, con i quali è stato possibile predisporre un *testbed* su cui provare alcune delle soluzioni proposte in letteratura o sviluppate dai ricercatori del gruppo stesso. In questo modo, l'attività di ricerca si è arricchita di un ulteriore metodo di indagine, basato su misure empiriche e prove sul campo, che va ad affiancare e completare gli studi di natura teorica e simulativi, più tipicamente accademici.

Nel seguito di questo articolo si descriverà dapprima l'architettura di base di un nodo sensore, al fine di chiarire quali siano le potenzialità e i limiti di una rete di sensori. Quindi, si presenteranno alcuni dei possibili scenari applicativi per WSN, ponendoli in relazione con i progetti pilota finanziati dalla Comunità Europea su queste tematiche. Successivamente si considereranno gli aspetti relativi alla progettazione di una WSN, facendo un rapido riferimento ad alcune delle soluzioni presenti sul mercato. Infine, ci si soffermerà sulla piattaforma sperimentale realizzata nel laboratorio SIGNET e si presenteranno brevemente alcuni dei risultati ottenuti per mezzo del *testbed* sperimentale. Il testo è accompagnato da tre riquadri di approfondimento, dedicati rispettivamente al progetto europeo *Embedded WiSeNts* [2] sui sistemi di oggetti cooperanti, ai sistemi operativi per reti di sensori e alla piattaforma EyesIFX v2, utilizzate nella rete sperimentale di SIGNET.

2. Architettura di un nodo sensore

Per comprendere appieno le potenzialità e i limiti di una WSN è necessario descrivere almeno genericamente l'architettura del nodo sensore. Una rappresentazione di principio è data in figura 2,

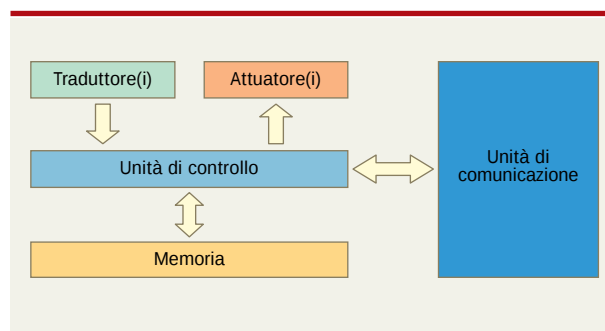


FIGURA 2 ► Architettura di principio di un nodo sensore.

dove si evidenziano cinque blocchi funzionali: trasduttori, attuatori, unità di elaborazione e controllo, memoria, ed unità di comunicazione.

2.1 Trasduttori e attuatori

Il *trasduttore* è un dispositivo in grado di misurare delle grandezze fisiche o ambientali di diversa natura trasformandole in un segnale elettrico opportuno. Poiché questo tipo di operazione, in inglese, viene detta "*sensing*," i trasduttori vengono spesso chiamati *sensori*. Questa terminologia può originare confusione, in quanto il termine *sensore* viene comunemente utilizzato sia per l'unità di sensing vera e propria, sia per il sistema *embedded* (nodo sensore) nel suo complesso. Per evitare ambiguità, nel seguito dell'articolo si userà l'espressione "nodo sensore" per riferirsi all'intera piattaforma hardware, mentre il termine "sensore" verrà riservato ai soli elementi di trasduzione.

I sensori che si possono trovare in commercio sono numerosissimi e includono trasduttori di temperatura, umidità, intensità luminosa, e pressione, come anche sensori per il rilevamento di fumo, sostanze tossiche (disperse nell'aria o nel suolo) o radioattività, telecamere, sensori di prossimità e così via. Un sensore, quindi, è in grado di rivelare e/o misurare grandezze ambientali, senza tuttavia poterle modificare. Un ruolo duale è svolto dagli *attuatori*, dispositivi in grado di *agire* sull'ambiente circostante in diversi modi. Esempi di attuatori sono bracci meccanici, valvole, irrigatori, ma anche sirene d'allarme, altoparlanti, videoproiettori, caloriferi, ...

Un nodo sensore può comprendere un numero variabile di trasduttori e attuatori, anche di diversa natura, che possono essere combinati e utilizzati nei modi più disparati. L'equipaggiamento del nodo sensore, quindi, ne determina le funzionalità, ma anche il costo, il consumo energetico e l'ingombro.

2.2 Unità di elaborazione e controllo

L'unità di elaborazione contiene un microprocessore, o *CPU* (*Central Processing Unit*), che fornisce l'*intelligenza* necessaria al dispositivo per operare in modo autonomo. Il ruolo della CPU può essere svolto da diverse tipologie di circuiti logici. Comunemente la scelta ricade su un microcontrollore a basso consumo, ma è possibile impiegare anche un *FPGA* (*Field Programmable Gate Array*), un *DSP* (*Digital Signal Processing*) o un *ASIC* (*Application Specific Integrated Circuit*), anche a supporto del microprocessore per diminuirne il carico di calcolo.

Oltre al microprocessore, l'unità di elaborazione contiene un convertitore analogico-digitale (ADC), utilizzato per tradurre i segnali elettrici generati dai trasduttori in forma digitale in modo da consentirne l'elaborazione software. Analogamente, è spesso presente un'unità duale, ovvero un convertitore digitale-analogico (DAC), che trasforma segnali numerici generati dal microprocessore in segnali elettrici utilizzati per pilotare gli attuatori.

2.3 Memoria

Il microprocessore è spesso integrato con alcuni blocchi di memoria *ROM* (*Read Only Memory*) e *RAM* (*Random Access Memory*), utilizzati per ospitare il codice eseguibile del sistema operativo e dell'applicazione, nonché i dati acquisiti dai sensori ed elaborati dall'applicazione. La gestione e l'utilizzo delle memorie è una fonte di consumo energetico, pertanto i blocchi di memoria integrati hanno capacità ridotte, limitate a poche decine di kbyte. Alcune piattaforme, tuttavia, possono essere dotate di *memorie Flash* aggiuntive, connesse al microprocessore per mezzo di interfacce seriali. Queste memorie, solitamente di capacità superiore rispetto alle memorie integrate con il microprocessore, possono essere utilizzate per contenere parametri per la configurazione del nodo o altri dati. Chiaramente, l'utilizzo delle memorie aggiuntive aumenta la potenzialità del nodo, ma influisce negativamente sui consumi energetici.

2.4 Unità di comunicazione

La comunicazione tra nodi sensori si realizza tipicamente per mezzo di segnali radio anche se, per alcune applicazioni, sono possibili soluzioni alternative che impiegano comunicazioni ottiche o ultrasuoni, come nel caso delle reti di sensori subacquee. Solitamente tra tutti i componenti del nodo, il chip radio è il dispositivo che consuma la maggior parte dell'energia. Per ridurre il costo e il consumo energetico dei nodi, si utilizzano tipicamente modulazioni ben consolidate e di bassa complessità, a discapito della capacità trasmissiva che è spesso limitata a qualche decina di kbit/s. Per limitare ulteriormente il costo finale del dispositivo, la modulazione radio avviene normalmente nelle bande comprese tra gli 868-870 MHz o nelle bande *ISM* (*Industrial Scientific Medical*) attorno ai 900 MHz e ai 2,4 GHz, per le quali non è richiesta licenza governativa.

2.5 Software

Oltre all'hardware, la piattaforma deve ospitare il software necessario a gestire la comunicazione tra i diversi nodi e a realizzare i servizi più avanzati. Sfortunatamente, le peculiarità delle reti di sensori e le caratteristiche dei nodi rendono difficilmente riutilizzabile il software disponibile in commercio e richiedono lo sviluppo di soluzioni progettate appositamente per la piattaforma utilizzata e per la specifica applicazione da realizzare. Questa argomentazione vale anche per il sistema operativo, a cui è richiesto di soddisfare i seguenti requisiti:

- ridottissima occupazione di memoria;
- basso consumo di energia durante l'esecuzione dei processi;
- consumo quasi nullo durante lo stato di inattività (*idle*);
- gestione della concorrenza (accesso simultaneo di più *thread* alla stessa risorsa);
- supporto efficiente (in termini di consumo energetico) ai protocolli di rete;

- facile accesso alle funzionalità di basso livello della piattaforma per mezzo di interfacce astratte.

Sulla base di queste considerazioni generali, sono stati recentemente proposti alcuni sistemi operativi appositamente disegnati per WSN, tra cui il più noto e diffuso è TinyOS [3]. Questo sistema operativo è stato sviluppato nell'Università di California, a Berkeley, a supporto della piattaforma sperimentale Tmote Sky, proveniente dagli stessi laboratori. Il successo di TinyOS è dovuto alla tempestività con cui il codice è stato sviluppato e reso pubblico, nonché alla posizione di prestigio e rilevanza internazionale di cui gode l'Università di Berkeley. Tuttavia, sono stati recentemente proposti altri sistemi operativi per WSN che offrono valide alternative a TinyOS (si veda il riquadro: "*Quando il Sistema Operativo si fa minuscolo*").

Generalmente, lo sviluppo del sistema operativo e delle applicazioni avviene per mezzo di linguaggi di programmazione derivati dal C, che vengono quindi compilati per lo specifico microprocessore del nodo sensore utilizzato. Tuttavia, è quasi sempre possibile ricorrere alla programmazione di

alcuni moduli nel linguaggio *Assembly* del microprocessore, se si desidera spingere al massimo le prestazioni del codice. Come per il sistema operativo, il software che definisce i servizi più avanzati della WSN deve occupare pochissimo spazio di memoria e deve risultare quanto più possibile efficiente in termini di consumi energetici. Questo comporta la necessità di progettare l'applicazione in modo da minimizzare quanto più possibile l'utilizzo delle diverse interfacce (radio, trasduttori, attuatori) e del processore, cosa che si traduce spesso in un *tradeoff* tra efficienza energetica del sistema e qualità del servizio offerto.

3. Scenari applicativi e progetti europei

Come spesso accade nel contesto delle reti di telecomunicazioni, lo spunto iniziale alla ricerca nel settore delle WSN è venuto dalle applicazioni in ambito militare. Uno degli utilizzi proposti in questo contesto consiste nel monitoraggio di una vasta area geografica per mezzo di nodi sensori, distribuiti in modo più o meno uniforme sul territorio da



... QUANDO IL SISTEMA OPERATIVO SI FA MINUSCOLO ...

TinyOS è un sistema operativo *open-source* sviluppato dall'università di Berkeley, in California. In sostanza, TinyOS consiste in alcuni moduli software che realizzano le funzionalità di base per il controllo del nodo sensore, come l'accesso ai registri del micro-controllatore, la scrittura e lettura dalla memoria EPROM, la gestione dell'interfaccia radio per la trasmissione e la ricezione dei dati, la generazione di numeri pseudo-casuali, e altro ancora. Non esiste un *kernel* che gestisce le risorse disponibili, dividendole tra più applicazioni, ma solo uno *scheduler* che si limita a eseguire in sequenza i *task*, secondo una politica *preemptive First In First Out (FIFO)*. In altri termini, i vari *task* sono eseguiti nell'ordine con cui sono generati (FIFO), consentendo tuttavia allo *scheduler* di interrompere l'esecuzione di un *task* nel caso si verifichi un evento con priorità maggiore

(*preemption*). Quando non vi sono più funzioni in attesa di esecuzione lo *scheduler* porta il processore a riposo e attende la segnalazione di un nuovo evento per riprendere l'esecuzione. I moduli elementari forniti dal sistema operativo possono quindi venire utilizzati dai programmatori per sviluppare applicazioni o funzionalità avanzate.

Il codice di TinyOS è scritto in *nesC*, una variante del linguaggio C concepita per sistemi *embedded* e ottimizzata per la programmazione dei sensori [26]. NesC è anche utilizzato per lo sviluppo delle applicazioni, rendendo così possibile un'integrazione molto spinta con il sistema operativo. Nel codice eseguibile che viene generato dal compilatore, inoltre, vengono inclusi solo i moduli del sistema operativo effettivamente utilizzati dall'applicazione. Ciò consente di ridurre al minimo l'*ingombro* del programma che dovrà essere trasferito ed eseguito dal nodo sensore, condizione indispensabile in sistemi con uno spazio di memoria limitato a qualche decina di kbyte.

Pertanto, TinyOS si differenzia in maniera sostanziale dai sistemi operativi tradizionali (*general purpose*), integrandosi direttamente con le applicazioni sviluppate. Esso semplifica notevolmente lo sviluppo di appli-

cazioni per WSN, mascherando le funzionalità di più basso livello della piattaforma per consentire al programmatore di concentrarsi sugli aspetti d'interesse. Tuttavia, per raggiungere prestazioni elevate è necessaria un'analisi minuziosa delle operazioni elementari eseguite dal programma, al fine di individuare le criticità.

Nonostante TinyOS sia il più popolare e diffuso sistema operativo per WSN, non è di certo l'unico e, a dire di molti, neppure il migliore. Un'alternativa a TinyOS è offerta da Contiki, un sistema operativo *open source* per WSN [27], sviluppato principalmente da SICS (Swedish Institute of Computer Science) e dai partner del progetto europeo RUNES [28]. A differenza di TinyOS, Contiki supporta il *multi-threading*, vale a dire l'esecuzione parallela di più processi, per mezzo del modulo *protothreads*. Si tratta di una versione di *multithreading* ottimizzata per piattaforme con limitate capacità di calcolo e memoria, che facilita la programmazione dei nodi e del sistema operativo stesso. Ad oggi, tuttavia, il software disponibile per Contiki è molto più scarso di quello sviluppato per TinyOS, anche se i promotori di Contiki stanno lavorando attivamente per colmare questa distanza.

controllore, in grado di rilevare la presenza di agenti chimici o patogeni nell'aria oppure i movimenti di truppe nemiche sul territorio. Normalmente, i nodi sensore sono alimentati a batterie o a celle solari, pertanto hanno un'autonomia energetica ridotta e non sono in grado di trasmettere il segnale radio a grandi distanze. Per questo, la WSN può essere dotata di un certo numero di nodi speciali, detti *sink*, che possono avere capacità di elaborazione e trasmissione di gran lunga superiori a quelle dei nodi sensore. Quindi, i dati raccolti dai nodi sensore vengono propagati con una modalità multi-tratta (*multihop*) fino al *sink* più prossimo, dove vengono elaborati e trasmessi al centro di controllo per mezzo di sistemi di comunicazione a lungo raggio.

È interessante osservare che, in questo scenario, l'informazione nasce dalla *cooperazione* tra i diversi elementi della rete. Ad esempio, l'identificazione di una truppa nemica sul territorio avviene correlando assieme le indicazioni provenienti da diversi nodi sensore disposti nella stessa area che rivelano simultaneamente la presenza di movimento nel settore monitorato. La segnalazione di un nodo, presa singolarmente, non è significativa in quanto potrebbe essere dovuto al rilevamento di un evento spurio (causato, ad esempio, dal passaggio di un animale selvatico in prossimità al nodo) oppure a un malfunzionamento del nodo stesso.

Siamo quindi di fronte a un nuovo paradigma di comunicazione, in cui l'obiettivo si sposta dal trasporto affidabile di informazioni generate tra due nodi qualsiasi della rete, al recapito di un numero "sufficiente" di dati ad un insieme sottoinsieme specifico e limitato di nodi, i *sink*, al fine di consentire il riconoscimento dell'evento da monitorare. Alcuni delle grandezze misurate dai nodi sensore possono essere fuse con altre, oppure scartate o perse, senza per questo pregiudicare il corretto funzionamento della rete. Di contro, in questo tipo di applicazioni, i nodi non possono essere alimentati e controllati singolarmente. È quindi indispensabile che il sistema risulti quanto più possibile efficiente in termini di consumi energetici e robusto alle variazioni topologiche della rete, causate dalla distruzione di alcuni nodi o dall'esaurimento delle batterie.

Questo nuovo paradigma di comunicazione non ha tardato a trovare diverse applicazioni anche in ambiti civili, ad esempio nel contesto del monitoraggio ambientale, su cui si concentra anche il progetto europeo *GoodFood* [4]. In questo caso, la WSN è utilizzata al fine di monitorare e controllare le condizioni ambientali di coltivazioni specifiche, sia al chiuso (*indoor*) che all'aperto (*outdoor*). L'area da supervisionare può variare dalle centinaia di metri quadrati di una serra, a migliaia di chilometri quadrati di un latifondo, e il periodo di osservazione può estendersi anche per alcuni anni. Sensori distribuiti sul terreno coltivato possono rivelare periodicamente umidità dell'aria e del suolo, temperatura, intensità della luce, concentrazione del fertilizzante, e

così via e riportare tali letture a un nodo controllore. Questo nodo correla i dati ricevuti dai vari sensori e traccia l'evoluzione delle condizioni ambientali, determinando le azioni da intraprendere. Quindi, attiva gli attuatori opportuni, come annaffiatori, tende parasole (per oscurare una serra), umidificatori d'aria, trasmettendo i comandi per mezzo della WSN.

Oltre a *GoodFood*, l'utilizzo delle WSN per aiutare l'agricoltura e l'ambiente è oggetto di numerosi altri progetti europei. Ad esempio, *Hoghtrob* [5] si prefigge l'obiettivo di monitorare delle scrofe di un allevamento, per mezzo di sensori applicati agli animali. Il sistema permette di tracciare l'andamento di temperatura e pressione sanguigna degli animali, nonché di ricostruirne spostamenti e abitudini. In tal modo, è possibile ricavare alcune importanti informazioni, quali il periodo di fertilità dei diversi animali e la presenza di traumi (come una zampa rotta) o di alcune malattie che determinino variazioni nella postura o nel movimento naturale degli animali.

Il progetto *GlacsWeb* [6], invece, si propone di controllare il comportamento dei ghiacciai per mezzo di diversi sensori collocati sulla superficie e all'interno del ghiaccio. I dati collezionati dai sensori (temperatura, pressione, movimenti subglaciali) vengono trasmessi a stazioni di monitoraggio sulla superficie e correlati in modo da costruire una rete intelligente di monitoraggio.

Un altro possibile impiego delle WSN consiste nel monitoraggio dell'integrità di strutture civili, quali edifici, ponti, strade, dighe e così via. In questo caso, i sensori sono posizionati su punti strategici della struttura e rilevano variazioni di pressione e posizionamento rispetto a dei punti di riferimento e agli altri nodi. I sensori possono rilevare i dati periodicamente e trasmetterli a un nodo di controllo che, correlando le varie informazioni, è in grado di individuare qualsiasi variazione significativa nella forma della struttura. *Sustainable Bridges* [7] è un esempio di progetto europeo che si occupa di questa tematica.

Scenari applicativi di più ampio respiro sono quelli che contemplano l'impiego di WSN nella realizzazione dei cosiddetti Ambienti Intelligenti, o *Smart Environments*, argomento di cui si occupa il progetto *Smart Surroundings* [8]. L'idea di base è di costruire un ambiente in grado di adattarsi alle esigenze specifiche delle persone che lo vivono. Per esempio, un'area che ospita un'esposizione artistica potrebbe essere equipaggiata con nodi sensore in grado di determinare la posizione di un visitatore e fornire (su richiesta o spontaneamente) un insieme di informazioni dettagliate sulle opere in prossimità dell'utente o la direzione per i servizi più vicini con accesso per disabili.

Chiaramente, quelli descritti rappresentano solo alcuni dei possibili scenari applicativi per WSN, ma offrono un'idea della molteplicità ed eterogeneità di servizi che possono essere realizzati con queste tecnologie. Una visione d'insieme delle possibili applicazioni in relazione all'estensione spaziale della rete e alla densità dei nodi nell'area richiesta

per soddisfare i requisiti di qualità del servizio è data dal grafico di **figura 3**.

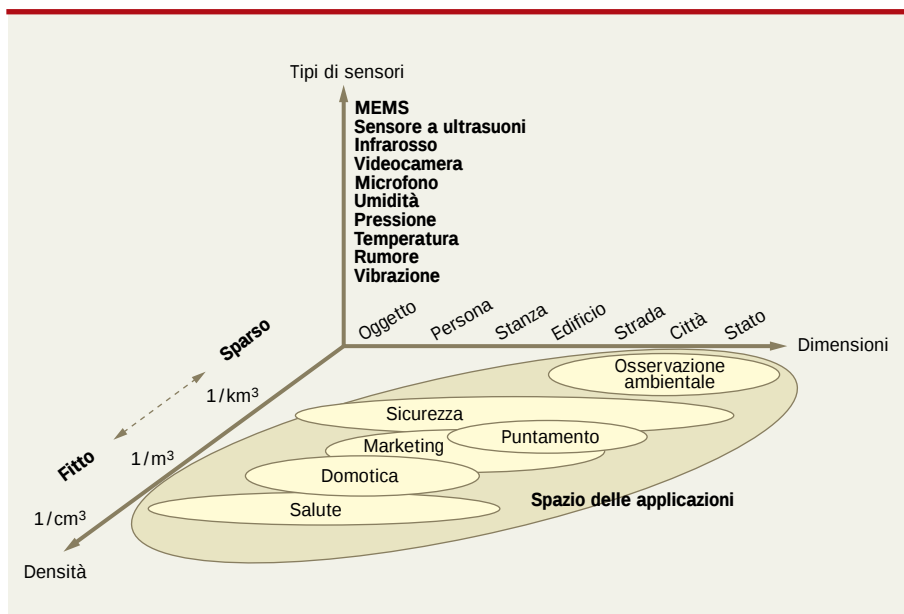


FIGURA 3 Spazio delle applicazioni WSN.

Una descrizione più completa delle attività di ricerca a livello europeo ed extra europeo nel contesto dei sistemi di oggetti cooperanti si può trovare in [9], documento redatto dal consorzio Embedded WiSeNts, dove vengono descritti diversi progetti di ricerca europei e, sulla base di questa indagine, viene proposta una classificazione delle varie aree tematiche interessate dallo sviluppo di soluzioni basate su WSN e un'indicazione dei settori in cui vi è maggior spazio per lo sviluppo di nuove soluzioni. Inoltre, applicazioni che potrebbero essere realizzate in un futuro non troppo lontano, sono descritte in [10], un altro documento pubblicato dal consorzio che raccoglie le migliori idee emerse nell'ambito del concorso "Sentient Competition," organizzato dal consorzio stesso, e avente come scopo la descrizione di scenari applicativi per sistemi basati su oggetti cooperanti che potrebbero essere resi una realtà nell'arco del prossimo decennio.

4. Progettazione di una WSN

L'eterogeneità e la limitatezza delle risorse dei nodi sensori, in termini di energia, potenza di calcolo e memoria, richiedono una progettazione accurata della struttura e dei protocolli di gestione della WSN in relazione all'applicazione specifica da realizzare.

Il risultato è lo sviluppo di soluzioni specificamente disegnate per l'applicazione per cui il sistema è concepito e difficilmente adattabili a scenari operativi diversi. Queste caratteristiche ostacolano l'abbattimento dei tempi e dei costi di

sviluppo di nuove applicazioni per WSN, rallentando di conseguenza la crescita del settore.

Al fine di superare queste difficoltà oggettive, alcune tra le più grosse aziende manifatturiere operanti nel settore dell'ICT hanno costituito il consorzio *ZigBee Alliance* che, a partire dal gennaio 2005, ha immesso sul mercato *ZigBee* [11], una soluzione completa per reti di sensori. *ZigBee* si basa sullo standard IEEE 802.15.4 per la trasmissione radio e la gestione dell'accesso al mezzo. Tuttavia, lo stack protocollare è stato completato con l'aggiunta di software per la creazione di reti (anche multi-tratta) e l'instradamento. La scelta dei protocolli per realizzare queste funzionalità è stata operata preferendo gli aspetti di semplicità implementativi e robustezza agli aspetti più prettamente tecnici e prestazionali, considerando quindi

soluzione ben note proposte nell'ambito delle reti radio ad hoc. Questa strategia ha consentito alla *ZigBee Alliance* di presentare sul mercato una soluzione completa e operativa in largo anticipo rispetto alla concorrenza. *ZigBee* è indicato per tutte quelle situazioni in cui si richieda la realizzazione di una semplice WSN in modo automatico e distribuito, senza necessità di sviluppare software di controllo e gestione apposito. Il tallone d'Achille della tecnologia, invece, secondo alcuni consta nel fatto che si tratta di una soluzione a "scatola chiusa" che non consente la gestione a basso livello della piattaforma e l'ottimizzazione dei protocolli alle esigenze specifiche del sistema che si intende realizzare.

Per realizzare soluzioni specifiche per un certo scenario applicativo è, dunque, necessario ricorrere ad altre piattaforme per reti di sensori, più flessibili nella gestione dei nodi e della pila protocollare. Alcune piattaforme reperibili sul mercato che rispondono ad una tale esigenza sono Tmote SKY, sviluppata all'Università di Berkley e commercializzata dallo spinoff Moteiv Corporation; MICA, prodotta e commercializzata da CrossBow; EyesiFXv2, prodotta da Infineon nel contesto del progetto europeo *EYES (Energy Efficient Sensor networks)* [12] e attualmente impiegata in diverse reti di sensori sperimentali. Per una panoramica più esauriente delle diverse piattaforme per WSN si può consultare il documento [13] dove, accanto ad una descrizione tecnica delle varie soluzioni, si possono trovare anche alcune considerazioni di carattere pratico che possono rivelarsi un'utile guida per la scelta della soluzione più adatta alle proprie esigenze.

La flessibilità nello sviluppo di una soluzione e, quindi, la possibilità di ottimizzare il sistema per una specifica applicazione, si paga in termini di complessità della progettazione e tempi di sviluppo. Gli aspetti da considerare sono molteplici e riguardano sia le caratteristiche hardware dei nodi, sia la dotazione del software. Di seguito si descrivono i principali elementi da considerare nel progetto di soluzioni per WSN.

- **Costo**

Per potersi svincolare da applicazioni puramente accademiche è indispensabile che l'utilizzo della WSN sia economicamente conveniente rispetto a soluzioni alternative; d'altro canto, solo una produzione di massa dei sensori può abbattere i costi e incentivarne l'utilizzo. La speranza è che entro pochi anni il costo di un nodo si riduca a un dollaro, anche se attualmente si è ancora lontani da questa previsione. I nodi EyesiFXv2, infatti, costano circa 70 euro, mentre il costo dei nodi Tmote-Sky si aggira attorno agli 80 dollari. Tuttavia, la commercializzazione di ZigBee, che condivide lo stesso livello fisico e di accesso al mezzo dei nodi Tmote Sky (IEEE 802.15.4), dovrebbe dare un buon impulso alla produzione di scala di queste piattaforme, abbattendone rapidamente il costo. Al costo della piattaforma si deve comunque aggiungere quello di altri moduli, come GPS (*Global Positioning System*), alimentatori e attuatori, nonché i costi di sviluppo del software, installazione e manutenzione.

- **Connettività**

Generalmente si parla di rete connessa se ogni nodo è in grado di comunicare con qualunque altro, eventualmente per mezzo di percorsi multihop che richiedono l'inoltro del messaggio da parte di nodi intermedi. In una WSN, tuttavia, questo genere di connettività non è garantito, in quanto i nodi passano lunghi periodi in stato di inattività (*sleep*) al fine di risparmiare energia, risultando raggiungibili solo in determinati intervalli di tempo. Inoltre, alcuni nodi possono risultare permanentemente fuori dai connessioni a causa di guasto o esaurimento delle riserve energetiche. Questo tipo di *connettività a intermittenza* deve essere attentamente considerata nella progettazione dei protocolli di comunicazione e dei meccanismi di inoltro dei dati che devono risultare robusti al partizionamento temporaneo e alle variazioni topologiche della rete e alla perdita di dati.

- **Hardware**

La limitata capacità di elaborazione e di memorizzazione dei nodi influenza tutte le scelte legate alla complessità degli algoritmi di comunicazione, localizzazione, instradamento, e così via. Inoltre, per poter essere utilizzati negli ambienti più disparati è necessario che i nodi siano di piccole dimensioni e leggeri, cosa non semplice per la presenza di componenti non facilmente integrabili come batteria e antenna.

- **Posizionamento dei nodi**

La disposizione dei nodi ha un notevole impatto sulle prestazioni del sistema e sulla connettività della rete e, quindi, va considerata con attenzione. Negli scenari in cui è possibile pianificare con anticipo la topologia della rete è solitamente possibile realizzare algoritmi di gestione più efficienti. Tuttavia, quando condizioni ambientali o vincoli di altra natura obbligano ad una distribuzione casuale dei nodi, ad esempio lanciandoli da veicoli in volo, allora diventa indispensabile calcolare con accuratezza il numero di nodi da distribuire sul territorio per garantire un certo livello di connettività e progettare in modo opportuno i protocolli di gestione della rete.

- **Mobilità**

In genere le WSN sono caratterizzate da un basso grado di mobilità. Tuttavia, alcune applicazioni prevedono che una parte dei nodi della rete possano spostarsi autonomamente, con mezzi propri o perché collocati su oggetti mobili, oppure a causa di eventi esterni. In tal caso si parla più propriamente di *MANET (Mobile Ad-hoc Network)*. Velocità di spostamento e grado di mobilità influenzano sulla progettazione di tutti i protocolli di gestione e, in particolare, sui protocolli di accesso al mezzo (*MAC*) e di instradamento [14].

- **Scalabilità**

Il numero di nodi di cui è composta una rete può variare da qualche decina a diverse migliaia, a seconda dell'applicazione. Le soluzioni sviluppate devono, quindi, essere in grado di scalare opportunamente con il numero di nodi nella rete.

- **Elaborazione in tempo reale**

Alcune applicazioni, come il *tracking* o il puntamento di oggetti, richiedono di elaborare in tempo reale (ovvero in un intervallo di tempo sufficientemente piccolo) eventi rilevati da diversi nodi. La rapidità nel *processing* dei dati e la capacità di sincronizzare i nodi con una precisione adeguata possono diventare fattori critici nella progettazione dei protocolli e dei servizi offerti dalla WSN.

- **Sicurezza**

Una WSN può essere soggetta a molteplici tipi di attacco alla sicurezza. Oltre ai classici problemi di intercettazione e interferenza (*jamming*) che affliggono le comuni reti radio, la natura distribuita delle WSN le rende fragili rispetto ad altre forme di intrusione, come il *tampering*, che consiste nell'introduzione nella rete di nodi manomessi o estranei che la rete potrebbe accettare come propri, consentendo a questi di alterare o intercettare le comunicazioni.

- **Consumo energetico**

Una WSN, nelle sue applicazioni tipiche, si sviluppa in ambienti ostili o comunque difficilmente raggiungibili. Garantire ai nodi un tempo di vita elevato è una priorità che può giustificare anche una parziale riduzione delle prestazioni. Non va dimen-

ticato inoltre che le operazioni di sostituzione delle sorgenti di alimentazione, se possibile, è in genere molto costosa in termini economici e, soprattutto, di tempo. Pertanto tutte le soluzioni proposte per reti di sensori dovrebbero essere fortemente orientate alla massima efficienza energetica.

5. Ricerca e sperimentazione all'Università di Padova

Le WSN sono da anni argomento di studio per i ricercatori del gruppo *SIGNET* (*Special Interest Group on NETworking*), afferente al *Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DEI)* all'Università di Padova. Il gruppo attualmente si compone di più di dieci ricercatori, a cui si vanno ad aggiungere alcuni collaboratori e tecnici laureati che coadiuvano le attività del laboratorio. Grazie ad una nutrita rete di contatti con le maggiori università e aziende europee e statunitensi, il laboratorio è spesso visitato da ricercatori stranieri con i quali si stabiliscono rapporti di collaborazione scientifica e di scambio reciproco di risorse e conoscenze. Il laboratorio, inoltre, accoglie ogni anno alcune decine di studenti di Ingegneria delle Telecomunicazioni, impegnati nello sviluppo di tesi di laurea magistrale sulle tematiche di interesse per il gruppo *SIGNET*.

L'attività scientifica del gruppo è principalmente focalizzata sulla progettazione, l'analisi e l'ottimizzazione di protocolli per la gestione di reti radio. Gli argomenti considerati includono lo studio di tecniche di accesso e instradamento per WSN [15], reti ad hoc e sistemi eterogenei [16]; sistemi radio per reti industriali [17][18]; l'analisi delle prestazioni di *scatternet Bluetooth* [19][20], le problematiche di supporto di traffici multimediali su reti wireless [21][22], finanche le reti inter-veicolari [23] e l'applicazione di modelli economici alla progettazione di scheduling per reti radio [24].

Quasi tutte le attività di ricerca trovano inserimento nel contesto di progetti nazionali e internazionali o in contratti di ricerca con aziende operanti nel settore. Tra questi, va menzionato il progetto europeo *Embedded WiSeNts* [25], il cui scopo è diffondere a livello europeo la conoscenza e l'interesse sui sistemi di oggetti cooperanti e promuoverne lo sviluppo. Per raggiungere tale obiettivo, il consorzio si è fatto promotore di diverse iniziative, quali l'organizzazione di conferenze internazionale, la raccolta di materiale didattico e informativo, lo scambio di studenti e ricercatori tra le sedi interessate, la redazione e diffusione di rapporti tecnici sullo stato dell'arte nel campo degli oggetti cooperanti e altro ancora (si veda il riquadro: "*Embedded WiSeNts*").

La partecipazione a questi progetti ha promosso il contatto con altri ricercatori italiani e europei, contribuendo al consolidamento delle competenze del *SIGNET* nel settore delle WSN. Inoltre, la partecipazione al progetto europeo *EYES* (IST-2001-34734), conclusosi nel 2004, ha consentito al gruppo *SIGNET* di acquisire un numero considerevole di piattaforme *EyesIFXv2*,

un prototipo di nodo sensore sviluppato da Infineon e attualmente impiegato in diverse WSN sperimentali.

L'acquisizione dei nodi *EyesIFXv2* ha finalmente reso possibile affiancare all'indagine teorica e simulativa uno studio empirico, basato su esperimenti condotti in un sistema reale. A questo fine, è stato allestito un *testbed* per WSN nel laboratorio *SIGNET*, disegnato in modo da risultare flessibile, espandibile e di facile accesso. Inoltre, è stato sviluppato un opportuno software di gestione che facilita la programmazione dei nodi, il debug delle applicazioni e l'acquisizione dei risultati. Sia la piattaforma sperimentale che il software di gestione sono stati sviluppati in un'ottica di modularità, pensando alle molteplici attività di studio che il gruppo si prefigge di realizzare sul *testbed*.

5.1 La piattaforma sperimentale

Il *testbed* allestito nel laboratorio *SIGNET* appare come in figura 4. La stanza è pressoché quadrata con una superficie di circa 90 m². La rete sperimentale si compone di 48 nodi *EyesIFXv2*, disposti su di una griglia sospesa a 60 cm dal soffitto della stanza, in modo da limitare gli effetti di schermatura causati da calcolatori e persone presenti nel laboratorio. I nodi sono appesi a corde nautiche dello spessore di 2 mm, costituite da un'anima di cotone rivestita da una trama intrecciata di nylon. Tali corde sono tese per tutta la larghezza della stanza e vengono fissate alle pareti mediante ganci a pressione e tensori metallici regolabili. I nodi sono fissati alle corde in modo da risultare paralleli al pavimento, con le antenne rivolte verso il basso. Inoltre, ogni nodo è connesso a un cavo *USB* (*Universal Serial Bus*) che viene fatto correre lungo la corda, attraverso cui si alimenta e si programma la piattaforma *EyesIFXv2*.



FIGURA 4 Laboratorio *SIGNET* con *testbed* per reti di sensori.

Un'immagine dettagliata del nodo EyesIFX è mostrato in **figura 5**, dove sono stati posti in evidenza i vari componenti del sistema. Una descrizione più dettagliata dei vari elementi della piattaforma si può trovare nel riquadro dedicato, mentre la **tabella 1** ne sintetizza le principali caratteristiche tecniche.

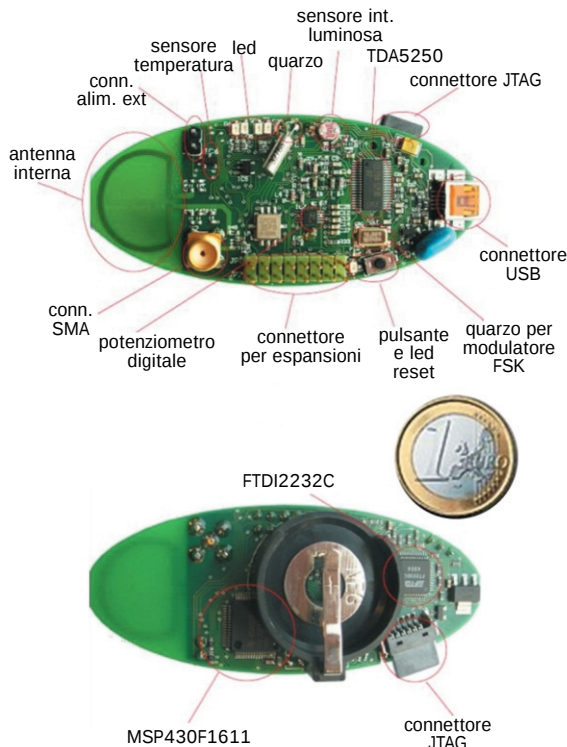


FIGURA 5 Piattaforma EyesIFX v2.0 (faccia superiore e inferiore).

I nodi Eyes sono supportati dal sistema operativo TinyOS. Il programma, sviluppato in NesC (si veda il riquadro: **"Quando il Sistema operativo si fa minuscolo"**), può essere compilato e installato singolarmente su ogni nodo. Questa operazione, concettualmente semplice, risulta nella pratica piuttosto lenta e tediosa in quanto il codice deve contenere l'indirizzo del nodo che si intende programmare, cosa che impedisce di agire simultaneamente su più nodi. Al fine di superare questo ostacolo, il gruppo SIGNET ha sviluppato un software di gestione che consente di programmare simultaneamente diversi nodi, nonché di verificarne il corretto funzionamento e di raccogliere i dati e misurazioni. Il software è stato corredato di una interfaccia grafica semplice e intuitiva, che ne facilita l'uso.

5.2 Primi risultati sperimentali

La predisposizione della piattaforma e del software di gestione hanno richiesto alcuni mesi di

lavoro, ma hanno permesso di acquisire "confidenza" con il sistema operativo e le peculiarità della piattaforma EyesIFXv2. Nel contempo si sono condotte alcune attività sperimentali mirate alla caratterizzazione dei nodi EyesIFXv2 in termini di raggio di copertura e affidabilità della comunicazione.

Caratteristica	Valore
Tensione di alimentazione	3 V
Consumo di corrente in modalità di risparmio energetico	9 μ A
Consumo di corrente con radio in trasmissione	12 mA
Consumo di corrente con radio in ricezione	9,42 mA
Massima potenza in trasmissione	4 dBm
Modulazione	FSK
Frequenza di trasmissione	868,3 MHz
Raggio massimo di copertura outdoor	~80 m
Raggio massimo di copertura indoor	~40 m
Velocità di trasmissione	19200 bit/s
Capacità memoria RAM	10 kB
Capacità memoria ROM	48 kB
Trasduttori	Luce, Temperatura, RSSI
Costo	~70 euro per sensore, ~300 euro per kit di prova
Sistema Operativo	TinyOS

FSK = Frequency Shift Keying
 RAM = Random Access Memory
 ROM = Read Only Memory
 RSSI = Radio Signal Strength Indicator

TABELLA 1 Caratteristiche principali della piattaforma per reti di sensori EyesIFX v2.0.

La caratterizzazione dei nodi è stata eseguita per mezzo di una campagna di misure effettuate all'aperto (*outdoor*), utilizzando una sola coppia di nodi. Un nodo è stato programmato per trasmettere pacchetti a intervalli regolari, mentre l'altro è stato impostato per ricevere tali pacchetti e memorizzare il valore di RSSI (*Radio Signal Strength Indicator*) prelevato, che dovrebbe fornire una misura della potenza ricevuta (si veda il riquadro: **"La piattaforma EyesIFXv2 in dettaglio"**). Si sono eseguite una serie di misure, allontanando progressivamente il nodo in ricezione dal trasmettitore. Al fine di verificare l'isotropia delle antenne sul piano orizzontale, inoltre, le misure sono state ripetute a parità di distanza tra i due nodi, ma ruotando il nodo ricevitore secondo l'asse dell'antenna esterna. I dati raccolti sono illustrati in **figura 6**, che mostra su un grafico tridimensionale il valore di RSSI misurato in funzione della distanza. La terza dimensione è relativa all'angolo di rotazione dell'antenna in ricezione attorno al proprio asse.

Si può osservare che, come atteso, il valore di

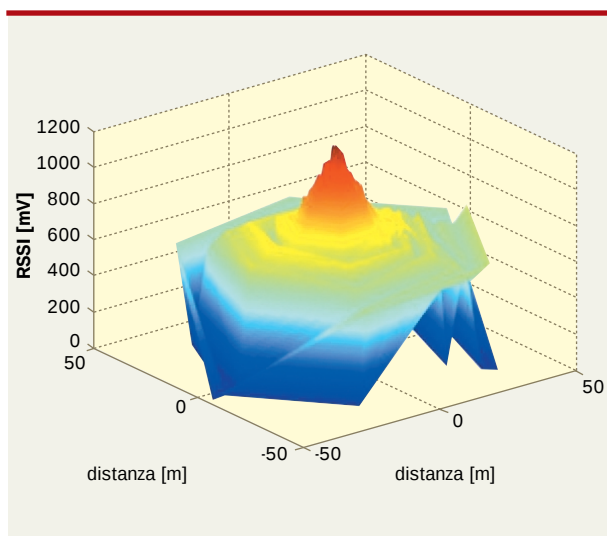


FIGURA 6 ▶ RSSI misurato al variare della distanza e della rotazione sull'asse dell'antenna di ricezione.

RSSI misurato decresce all'aumentare della distanza, eccezion fatta per alcuni punti in cui si è verificata una perdita ingente di pacchetti in ricezione. Tali perdite sono spesso causate da fenomeni di riflessioni del segnale sul terreno che producono interferenza distruttiva al ricevitore. Alle volte, tuttavia, gli errori in ricezione possono essere causati da malfunzionamenti temporanei dei nodi, che si risolvono nel modo più classico, ovvero riavviando la piattaforma! Dalla figura si nota anche come la caratteristica di radiazione risulti abbastanza indipendente dall'angolo di ricezione, verificando quindi l'ipotesi di isotropia planare dell'antenna.

Oltre alle attività qui presentate, il gruppo sta realizzando altri progetti, con lo scopo di creare un insieme di moduli software che offrono servizi di base, come la localizzazione dei nodi nell'area, l'accesso al mezzo e l'instradamento, e che possono essere composti per creare diverse applicazioni.



Embedded WiSeNts (Wireless Sensor Networks)

Embedded WiSeNts è una Azione Coordinata finanziata dalla Commissione Europea nell'ambito delle Tecnologie per la Società dell'Informazione nel sesto programma quadro. Il progetto, che ha avuto inizio il primo settembre 2004 e si concluderà ufficialmente il 31 agosto 2006, si compone di dodici partner, provenienti da dieci diversi stati Europei, che vantano una vasta esperienza nel campo delle comunicazioni radio, dei sistemi di calcolo distribuito e ubiquo e, in particolare, delle reti radio di sensori. I partner italiani sono il *Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione (DEI)* dell'Università di Padova, e il *Consorzio Interuniversitario Nazionale per l'Informatica (CINI)*, di Roma.

L'obiettivo principale di **Embedded WiSeNts** è promuovere la ricerca a livello europeo sui sistemi di *oggetti cooperanti (COS)*. L'azione del consorzio si rivolge sia agli enti di ricerca pubblici e privati che alle aziende interessate alla produzione delle tecnologie di base o allo sviluppo di ser-

vizi per tali sistemi. Per raggiungere questo obiettivo, l'azione del consorzio si sviluppa in due direzioni principali.

- *Integrazione della ricerca esistente e promozione della didattica*

La ricerca in Europa sui diversi aspetti che costituiscono questo vasto scenario d'indagine, seppur ben avviata, si svolge ancora in maniera locale e isolata. Al fine di promuovere la creazione di una comunità di ricerca scientifica aperta, che faciliti la circolazione delle idee e delle conoscenze tra i ricercatori, il consorzio ha sponsorizzato le edizioni 2005 e 2006 della conferenza *EWSN (European Wireless Sensor Networks)* che ha radunato centinaia di ricercatori da tutta Europa e non solo. Inoltre, il consorzio ha avviato un programma di scambio di ricercatori tra le università europee e di visite da parte d'esperti internazionali nelle varie tematiche considerate nel progetto, allo scopo di creare contatti e agevolare la diffusione delle competenze.

Per promuovere l'insegnamento dei diversi argomenti che riguardano i COS, il consorzio sta realizzando un portale web dove reperire materiale didattico ed educativo sull'argomento. Inoltre, si sta ultimando un progetto pilota per consentire l'accesso via Internet a una rete di sensori, fisicamente realizzata in un laboratorio dell'Università di Copenhagen.

L'interfaccia web consentirà la prenotazione del testbed, la programmazione dei nodi, l'esecuzione dell'esperimento e la raccolta dei dati, tutto da remoto!

- *Definizione della "roadmap" per l'adozione della tecnologia*

L'obiettivo forse più lungimirante del consorzio è la definizione di una *roadmap* per lo sviluppo dei COS. In altri termini, ci si propone di identificare le tappe da percorrere nel prossimo decennio e gli ostacoli da superare al fine di rendere i COS una realtà sia tecnologica che commerciale. Per poter tracciare la roadmap è necessario acquisire una buona consapevolezza dello stato dell'arte attuale e dell'insieme di applicazioni che potrebbero essere rese possibili dai COS e che non sono realizzabili con le tecnologie e i sistemi odierni. A tal scopo, **Embedded WiSeNts** ha redatto una serie di studi che descrivono lo stato dell'arte per quanto riguarda le applicazioni e gli algoritmi per reti di sensori e sistemi distribuiti [9],[14],[29],[30] e un documento tecnico che riporta i risultati di un'indagine sulle piattaforme software e hardware e sugli strumenti disponibili per lo sviluppo di COS [13]. Il consorzio, inoltre, ha organizzato un concorso, intitolato *"Sentient Future Competition"*, per le più interessanti applicazioni futuristiche per COS [10].



LA PIATTAFORMA EYES/IFXv2

• Trasduttori

La piattaforma Eyes/IFX dispone di tre trasduttori: un sensore di temperatura, uno di luminosità e un circuito per la rilevazione della potenza del segnale radio ricevuto RSSI (*Radio Signal Strength Indicator*).

Il sensore di temperatura opera nell'intervallo da -30 a 100 °C, fornendo in uscita una tensione che può variare fra i 300 e 1600 mV, linearmente proporzionale alla temperatura espressa in gradi centigradi (+10 mV/°C). Il sensore è calibrato in modo tale da garantire un errore inferiore a circa 2,0 °C alle temperature usuali e comunque non superiore a circa 3,0 °C nell'intervallo da -25 a 85 °C.

Il sensore di luminosità è costituito da due celle fotoconduttrici al solfuro di cadmio con risposta spettrale simile a quella dell'osservatore tipico. La resistenza delle celle decresce all'aumentare dell'intensità luminosa, passando da valori dell'ordine di grandezza del *Mhom* in condizioni di buio fino al centinaio di *hom* se sottoposte a un flusso luminoso di 1000 lux.

La misura della potenza ricevuta (RSSI) avviene per mezzo di un circuito limitatore. Il segnale radio ricevuto viene separato nelle sue due componenti in fase e quadratura attraverso uno stadio di filtri passa

basso. Ciascun canale è seguito da un blocco di amplificatori multistadio con guadagno in banda di circa 80 dB. All'uscita degli amplificatori si preleva una tensione proporzionale alla potenza ricevuta da ogni canale. I due valori così ottenuti vengono sommati a formare il valore di RSSI complessivo.

Oltre a questa dotazione standard, la piattaforma mette a disposizione un connettore a 16 pin collegato al bus del microprocessore attraverso cui è possibile connettere una serie di attuatori che il nodo è in grado di pilotare. Sono anche disponibili quattro led, utili per semplici indicazioni dello stato del nodo.

• Microcontrollore

Il microcontrollore installato sui nodi Eyes/IFXv2 è il MSP430F1611 prodotto dalla Texas Instruments. Esso dispone di sei modalità di funzionamento, selezionabili via software, per ridurre il consumo energetico. Nelle modalità ad elevato risparmio energetico (stati sleep) il microcontrollore disattiva alcuni clock ed esegue solo poche routine di controllo in modo da ridurre al minimo il dispendio energetico. Un interrupt permette il risveglio del dispositivo da uno di questi cinque stati in modo da soddisfare la richiesta di servizio ricevuta, al termine della quale la CPU può ritornare a operare allo stato di sleep. Per preservare ulteriormente l'energia della batteria, il nodo dispone di un DMA (*Direct Memory Access*) che permette alle periferiche di accedere alla memoria senza risvegliare la CPU consentendo inoltre un accesso ai dati più veloce. La memoria integrata al microprocessore consiste in una RAM di 10 kbyte e una Flash ROM di 48 kbyte.

• Chip radio

Il circuito integrato TDA5250 prodotto da Infineon è un chip radio dai consumi ridotti che permette di creare un canale dati *half duplex* utilizzando una modulazione FSK (*Frequency Shift Keying*) sulla banda 868-870 MHz. La velocità di trasmissione teorica è di 64 kbit/s, ma essa viene limitata a soli 19,2 kbit/s dal firmware della piattaforma per ridurre i consumi energetici. Il chip è anche dotato di un circuito di auto-interruzione (*self polling*) che consente di evitare di "svegliare" il microprocessore nel caso la qualità del segnale sia tale da non garantire la corretta ricezione del pacchetto. Inoltre, l'integrato può essere posto in uno stato di basso consumo energetico (*Power Down Mode*) in cui assorbe 9 µA di corrente, circa tre ordini di grandezza in meno rispetto ai consumi in ricezione e trasmissione. La trasmissione e la ricezione del segnale radio avvengono per mezzo di un'antenna esterna compatta, realizzata tramite un disegno elicoidale, con uno spettro di emissione isotropico nel piano ortogonale al suo asse. Il nodo dispone inoltre di una seconda antenna radiante, integrata nel circuito stampato, che può essere selezionata in alternativa alla prima variando un contatto sulla scheda (operazione tutt'altro che agevole!).

• Alimentazione

Il sensore necessita di una tensione di alimentazione compresa tra i 2,7 V e i 3,6 V che può essere fornita tramite batteria, connessione USB o con un'alimentazione esterna. La batteria al litio (CR2477), tuttavia, può risultare sottomensionata per le potenze in gioco nei nodi, inficiando gravemente la comunicazione. Il problema non si presenta con le altre sorgenti di alimentazione.

6. Conclusioni

Le reti radio di sensori rappresentano uno degli argomenti più interessanti e promettenti nell'attuale panorama scientifico internazionale. I possibili campi di applicazione sono vastissimi e ancora largamente inesplorati. La commercializzazione dei primi dispositivi per reti di sensori, come *Bluetooth* e *ZigBee*, ha contribuito a portare queste tematiche al di fuori dei limitati confini dei laboratori di ricerca universitari, stimolando l'interesse di piccoli e grandi imprenditori che vedono nelle WSN sia uno strumento per

migliorare la produttività delle proprie imprese che una possibilità di espandere l'attività su un nuovo mercato.

Ad oggi, tuttavia, la realizzazione di molti degli scenari applicativi proposti per le WSN appare ancora lontana. Gli ostacoli principali sono costituiti dal costo ancora elevato dei nodi sensore, dalla limitatezza delle capacità d'elaborazione e trasmissione e dalla scarsa autonomia energetica. Tuttavia, la comunità scientifica sta lavorando alacremente per proporre soluzioni sempre più efficienti per WSN, sia in termini di hardware che di software per la gestione delle reti. Il risul-

tato di questa azione è stata la creazione di numerosi prototipi di nodi sensore, con funzionalità e limiti diversi. Nonostante la diffusione di diverse piattaforme per nodo sensore rappresenti, per certi versi, un ostacolo allo sviluppo di soluzioni standard per WSN, essa ha dato un notevole impulso all'attività di sperimentazione sul campo, promuovendo la creazione di testbed in svariati laboratori di ricerca, tra cui il laboratorio SIGNET, all'Università di Padova. La possibilità di confrontarsi con le problematiche tipiche dei sistemi reali offre ai ricercatori nuovi spunti per la definizione di soluzioni che siano più efficienti e, soprattutto, facilmente realizzabili su piattaforme commerciali.

La sperimentazione, dunque, rappresenta una tappa fondamentale nel percorso che porta un nuovo sistema di comunicazione alla maturità e al successo commerciale. Pertanto, è auspicabile che il diffondersi di reti sperimentali e la conseguente crescita dell'attività implementativa, aiutino le tecnologie per WSN a raggiungere un grado di avanzamento tale da consentire la realizzazione in un prossimo futuro della maggior parte degli scenari applicativi descritti, aprendo così un nuovo, stimolante mercato, ricco di aspettative e di potenzialità.

— ABBREVIAZIONI

ADC	Analog to Digital Converter
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
CINI	Consorzio Interuniversitario Nazionale per l'Informatica
COS	Sistemi di Oggetti Cooperanti
CPU	Central Processing Unit
DAC	Digital to Analog Converter
DEI	Department of Information Engineering
DSP	Digital Signal Processing
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSK	Frequency Shift Keying
ICT	Information and Communication Technologies
ISM	Industrial Scientific Medical
OS	Operative System
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
RSSI	Radio Signal Strength Indicator
SIGNET	Special Interest Group on NETworking
WSN	Wireless Sensor Network

— BIBLIOGRAFIA

- [1] "Special Interest Group on NETworking", Department of Information Engineering (DEI), University of Padova, Italy. www.dei.unipd.it/ricerca/signet/
- [2] "Embedded WiSeNts: Cooperating Embedded Systems for Exploration and Control featuring Wireless Sensor Networks" Project FP6-004400, (www.embedded-wisents.org)
- [3] "TinyOS: An open source operating system for WSN" (www.tinyos.net)
- [4] D. Guerri, M. Lettere, and R. Fontanelli, Ambient "Intelligence Overview: Vision, Evolution and Perspectives", 1st GoodFood Aml Workshop, Florence, 6/2004.
- [5] "Hogthrob, Networked on-a-chip nodes for sow monitoring", (www.hogthrob.dk/).
- [6] GlacsWeb (www.envisense.org)
- [7] Smart P. J. Marron, O. Saukh, M. Kruger, and C. Grose: "Sensor Network Issues in the Sustainable Bridges Project", European Project Session of the 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks (2005).
- [8] P. Havinga, P. Jansen, M. Lijding, and H. Scholten: "Smart Surroundings", Proceedings of the 5th Progress Symposium on Embedded Systems (2004).
- [9] Embedded WiSeNts consortium: "Applications & application scenarios", White paper, 4/2006, www.embedded-wisents.org
- [10] Embedded WiSeNts consortium: "Visionary Applications", White paper, 4/2006, www.embedded-wisents.org
- [11] William C. Craig: "Zigbee: Wireless Control That Simply Work", www.zigbee.org
- [12] "EYES: Energy efficient sensor networks", Project IST-2001-34734 (www.eyes.eu.org)
- [13] Embedded WiSeNts consortium: "Research Integration: Platform Survey. Critical evaluation of platforms commonly used in embedded wisents research" White paper, 4/2006, www.embedded-wisents.org
- [14] Embedded WiSeNts consortium: "Paradigms for algorithms & interactions", White paper, 4/2006, www.embedded-wisents.org
- [15] M. Zorzi and R. R. Rao: "Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: energy and latency performance", IEEE Trans. on Mobile Computing, vol. 2, no. 4, pp. 349–365, 2003.
- [16] M. Gerla, Y. Lee, R. Kapoor, T. Kwon, A. Zanella: "UMTS-TDD: A Solution for Internetworking Bluetooth Piconets in Indoor Environments", Proceedings of ISCC'02 Taormina, July 1-4, 2002
- [17] F. De Pellegrini, D. Miorandi, S. Vitturi, A. Zanella: "Use of New Generation WPANs for Real-Time Industrial

Communications", 10th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA2005). 19-22 September 2005

- [18] F. De Pellegrini, D. Miorandi, S. Vitturi, A. Zanella: "On the Use of Wireless Networks at Low Level of Factory Automation Systems". IEEE Transactions on industrial informatics. ISSN: 1551-3203. In Press.
- [19] D. Miorandi, A. Zanella, G. Pierobon: "Performance evaluation of Bluetooth polling scheme: an analytical approach" Mobile Networks and applications. vol. 9, pp. 63-72 ISSN: 1383-469X. Feb. 2004
- [20] R. Kapoor, A. Zanella, Per Johansson, M. Gerla: "A fair and traffic dependent scheduling algorithm for Bluetooth scatternets", Mobile Networks and applications. vol. 9, pp. 9-20 ISSN: 1383-469X. Feb. 2004
- [21] A. Zanella, D. Miorandi, S. Pupolin, and P. Raimondi: "On Providing Soft-QoS in Wireless Ad-Hoc Networks", Proceedings of WPMC'03, pp. 91-95, October 19-22 2003, Yokosuka, Kanagawa, Japan
- [22] F. De Pellegrini, F. Maguolo, A. Zanella., M. Zorzi: "A CrossLayer Solution for VoIP over IEEE802.11", WPMC2005. September 18-22, 2005 in Aalborg, Denmark
- [23] E. Fasolo., R. Furiato, A. Zanella: "Smart Broadcast algorithm for inter-vehicular communications", WPMC2005. September 18-22, 2005 in Aalborg, Denmark
- [24] L. Badia, S. Merlin, A. Zanella, M. Zorzi: "Pricing VoWLAN Services through a Micro-economic Framework", IEEE Wireless Communications. ISSN: 1536-1284. In press
- [25] Embedded WiSeNts consortium: "Applications & application scenarios", White paper, 4/2006, www.embedded-wisents.org
- [26] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci: "Wireless sensor networks: a survey", Computer Networks, 2002, vol 38, pp: 393-422
- [27] A. Dunkels, B. Grnvall, T. Voigt: "Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors". In Proceedings of the First IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors, Tampa, Florida, USA, November 2004.
- [28] "RUNES: Reconfigurable Ubiquitous Networked Embedded Systems", IST Project, www.ist-runes.org/
- [29] Embedded WiSeNts consortium: "Vertical system functions", White paper, Apr. 2006, www.embedded-wisents.org
- [30] Embedded WiSeNts consortium: "System architecture and programming models", White paper, 4/2006, www.embedded-wisents.org



Andrea Zanella ha conseguito la Laurea in Ingegneria dell'Informazione nel 1998 e il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettronica e delle Telecomunicazioni nel 2002, presso l'Università degli Studi di Padova. Nel 2001 ha trascorso nove mesi come ricercatore post-doc al dipartimento di Computer Science dell'Università della California, Los Angeles (UCLA), dove è stato attivamente impegnato in attività di ricerca su tematiche concernenti le reti radio e i protocolli Internet. Dal gennaio 2004 è in servizio come Ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione dell'Università di Padova, dove partecipa attivamente alle attività di ricerca e al coordinamento del gruppo SIGNET.



Michele Zorzi ha conseguito la Laurea in Ingegneria Elettronica, presso l'Università di Padova nel 1990 e il Dottorato di Ricerca nel 1994. Successivamente, ha trascorso tre anni nel Centro di Wireless Communications dell'Università di California a San Diego (UCSD), quindi è stato docente al Dipartimento di Elettronica e Informatica del Politecnico di Milano per trasferirsi nel 1998 al Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara. Dal 2003 è Professore Ordinario all'Università di Padova. La sua attività di ricerca include la valutazione delle prestazioni di sistemi di comunicazione mobile e, in particolare, le reti di sensori. Inoltre, è coinvolto nella editoria di diverse riviste del settore, come IEEE Wireless Communications Magazine, IEEE Transactions on Communications, IEEE Transactions on Wireless Communications, IEEE Transactions on Mobile Computing, il Wiley Journal of Wireless Communications and Mobile Computing e ACM/URSI/Kluwer Journal of Wireless Networks.