

Wireless sensor network

1 Wireless sensor network

Le reti di sensori wireless, **wireless sensor network (WSN)** sono reti molto **dense**, cioè costituite da moltissimi nodi (spesso centinaia o migliaia, fino talvolta ai milioni), chiamati *sensor nodes*, che comunicano mediante una **comunicazione wireless multi-hop**: ogni nodo rileva e trasmette i propri dati (*sensing*), ma inoltra anche i dati provenienti da altri nodi (*forwarding*). Tutti i dati vengono raccolti da un nodo chiamato **sink**, che li memorizza o li trasmette su una rete “convenzionale” (Internet, satellite, ecc.).

2 Hardware dei sensori

A livello hardware, un sensor node deve avere costi, dimensioni e peso limitati, ma al tempo stesso integrare tutte le funzionalità necessarie per l'applicazione, ed essere in grado di operare autonomamente, resistendo e adattandosi all'ambiente in cui viene installato. Le caratteristiche esatte dell'hardware dipendono dall'applicazione, ma, in generale, i principali componenti hardware di un sensor node sono:

- la **sensing unit**, che misura diverse grandezze fisiche, trasformando le misurazioni in valori digitali tramite un apposito convertitore (ADC, Analog-to-Digital Converter);
- la **processing unit** (CPU e memoria), grazie alla quale il sensor node è dotato di una (piccola) *capacità di processamento on-board*;
- un modulo ricetrasmittente (*transceiver*) e un'antenna;
- la **power unit**, una batteria (e talvolta una sorgente di energia per ricaricarla), che fornisce l'alimentazione necessaria per gli altri componenti. Un sensor node ha solitamente **risorse energetiche limitate**, anche perché in molte applicazioni non è possibile né ricaricare né sostituire la batteria, quindi la vita del sensore è limitata.

Alcuni sensori hanno poi anche altri componenti, come ad esempio un **location finding system** (GPS) e un **mobilizer**, che permette al sensore di spostarsi fisicamente.

L'hardware dei sensori ha avuto nel tempo una notevole evoluzione, caratterizzata da un aumento delle prestazioni e una diminuzione delle dimensioni, grazie in particolare ai progressi nel campo della microelettronica.

3 Applicazioni

Le wireless sensor network hanno svariate applicazioni, tra cui:

- Applicazioni *militari*:
 - monitoraggio di forze alleate, equipaggiamento e munizioni;
 - rilevamento di forze nemiche;
 - targeting;
 - valutazione dei danni;
 - rilevamento di attacchi nucleari, biologici e chimici;
 - rilevamento di mine;
 - monitoraggio dei confini nazionali.
- Applicazioni *ambientali*:
 - tracciamento dei movimenti degli animali;
 - monitoraggio delle condizioni ambientali che influenzano il raccolto;
 - irrigazione;
 - monitoraggio della terra ed esplorazione planetaria;
 - ricerche meteorologiche o geofisiche;
 - rilevamento di incendi boschivi.
- Applicazioni per la *salute*:
 - diagnostica;
 - telemonitoraggio di dati umani fisiologici;
 - tracciabilità e monitoraggio di medici, pazienti e infermieri all'interno di un ospedale;
 - monitoraggio della somministrazione di farmaci.
- *Smart roads*:
 - monitoraggio del traffico e rilevamento di incidenti;

- monitoraggio di parcheggi vuoti tramite comunicazione diretta tra i veicoli (car-to-car communication);
- rilevamento e monitoraggio di furti;
- tracciabilità dei veicoli.
- Altre applicazioni:
 - esplorazione spaziale;
 - controllo di processi chimici;
 - monitoraggio della qualità del prodotto;
 - domotica;
 - giochi interattivi;
 - musei interattivi;
 - ecc.

3.1 Underground wireless sensor network

I nodi di una wireless sensor network possono essere installati sotto terra, e convogliare le informazioni — sempre tramite comunicazione wireless a radiofrequenza — a una sink posizionata sulla superficie. In tal caso, si parla di **underground wireless sensor network**. Alcune applicazioni di questo tipo di rete sono:

- monitoraggio delle condizioni del suolo;
- comunicazioni vocali sotterranee (all'interno di caverne, miniere, ecc.);
- monitoraggio di terremoti;
- monitoraggio della qualità dei campi sportivi (golf, calcio, ecc.);
- localizzazione di persone all'interno di palazzi crollati;
- monitoraggio dei confini nazionali.

3.2 Underwater sensor networks

Un altro tipo di reti di sensori sono le **underwater wireless sensor network**, nelle quali i sensor nodes sono posizionati sott'acqua, e comunicano mediante onde acustiche (perché in genere le onde elettromagnetiche non si propagano facilmente nell'acqua). I sensori subacquei possono essere ancorati a delle boe, oppure essere mobili (ad esempio veicoli autonomi).

Alcune applicazioni delle underwater WSN sono:

- monitoraggio della condizione delle acque;
- rilevamento di batteri;
- monitoraggio di maremoti;
- assistenza alla navigazione.

Rispetto agli altri tipi di WSN, quelle subacquee presentano alcune difficoltà in più:

- limitazioni della comunicazione acustica:
 - banda disponibile limitata;
 - canale soggetto a multipath e path loss;
 - ritardo elevato (5 ordini di grandezza più alto rispetto alle trasmissioni terrestri a radiofrequenza) e variabile;
 - bit error rate alto, e perdite temporanee della connessione;
- potenza delle batterie limitata, e assenza di energia solare per la ricarica (ma esistono alcune fonti di energia alternative, come ad esempio il moto delle maree);
- sensor nodes soggetti a rottura a causa della corrosione provocata dall'acqua salata, ecc.

4 Progettazione

La progettazione delle WSN è influenzata dai seguenti fattori:

- **reliability** o **fault tolerance**;
- **scalabilità**;
- **costi di produzione**;
- **limitazioni dell'hardware**;
- **topologia** della rete;
- **ambiente applicativo**;

- **mezzo di trasmissione;**
- **consumo di potenza.**

4.1 Reliability

I sensor nodes possono rompersi, smettere di funzionare, a causa di una perdita di potenza (ad esempio quando la batteria si scarica), di danno fisici o di interferenze ambientali, e la rottura di un nodo non deve danneggiare l'operatività di tutta la rete di sensori.

La capacità di mantenere le funzionalità della rete di sensori senza alcuna interruzione è chiamata **reliability** o **fault tolerance**.

La reliability di un singolo nodo sensore k è modellata dalla formula

$$R_k(t) = e^{-\lambda_k t}$$

che esprime la probabilità di *non* avere un failure (la rottura del sensore) nell'intervallo di tempo $(0, t)$; il parametro λ_k rappresenta il failure rate del nodo k . Data poi una rete costituita da N nodi, la sua reliability è calcolata da

$$R(t) = 1 - \prod_{k=1}^N (1 - R_k(t))$$

che è la probabilità che almeno uno degli N nodi continui a funzionare nell'intervallo di tempo $(0, t)$. Se tutti i nodi hanno la stessa reliability $R_k(t)$, allora la formula si semplifica a

$$R(t) = 1 - (1 - R_k(t))^N$$

I protocolli e gli algoritmi impiegati nella rete possono essere progettati per soddisfare la fault tolerance richiesta. Se l'ambiente ha un basso livello di interferenza, allora il requisito può essere meno stringente; ad esempio:

- i sensori usati per monitorare umidità e temperatura in un ambiente domestico non possono essere facilmente danneggiati o subire interferenze dall'ambiente, quindi si ha un basso requisito di reliability;
- in un campo di battaglia, i dati raccolti sono informazioni critiche, e i sensori possono essere distrutti dal nemico, quindi si ha un requisito di reliability alto.

In altre parole, la reliability dipende pesantemente dall'applicazione.

4.2 Scalabilità

A seconda dell'applicazione, il numero di sensori può raggiungere i milioni, e la densità dei sensori in una regione (chiamata *cluster*), che può essere di meno di 10 m di diametro, varia da pochi a parecchie migliaia.

Data una regione di area A , in cui sono presenti N sensori che hanno un raggio di trasmissione (*radio range*) R , la **densità** è data dalla formula

$$\mu(R) = \frac{N\pi R^2}{A}$$

È importante sottolineare che, anche se l'area A al denominatore fosse circolare, essa non si semplificherebbe con i fattori πR^2 al numeratore, perché il raggio di copertura R del segnale trasmesso da ciascun sensore non necessariamente coinciderebbe con il raggio dell'area A in cui i sensori sono posizionati.

La densità dipende dall'applicazione. Ad esempio:

- nelle applicazioni *smart road* si hanno tipicamente circa 10 sensor nodes per regione;
- in applicazioni domestiche si potrebbero avere in totale una decina di sensori, a seconda della dimensione della casa;
- per il monitoring degli habitat naturali si potrebbero avere da 25 a 100 nodi in ciascuna regione.

4.2.1 Esempio di calcolo

Si suppone che i sensor nodes siano distribuiti in modo omogeneo nel campo. Se ogni nodo ha un raggio di trasmissione $R = 5$ m, e una regione di $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ contiene $N = 200$ nodi, allora la densità è

$$\mu(R) = \frac{200 \cdot \pi (5 \text{ m})^2}{50 \text{ m} \cdot 50 \text{ m}} = \frac{200 \cdot \pi \cdot 25 \text{ m}^2}{2500 \text{ m}^2} = 2\pi \approx 6.28$$

4.3 Costi

Siccome una WSN contiene spesso moltissimi nodi, il costo di ciascun sensor node deve essere il più basso possibile. L'obiettivo da raggiungere sarebbe un costo minore di un dollaro, ma in pratica i costi attuali sono ancora troppo alti (da qualche decina a più di 100 dollari per sensore).

4.4 Limitazioni dell'hardware

Le caratteristiche dell'hardware di un sensore determinano le operazioni che è in grado di svolgere, influenzando su molti degli altri fattori elencati prima, tra cui ad esempio i costi di produzione e il consumo di potenza.

4.5 Topologia

La gestione della topologia di una WSN avviene in tre fasi:

- pre-deployment (la progettazione iniziale della rete) e deployment (l'installazione dei sensori);
- post-deployment;
- re-deployment di nodi aggiuntivi.

Il deployment dei nodi può essere casuale (*random deployment*), se ad esempio i sensori vengono gettati da un aereo, oppure può essere ben progettato e fissato (*regular deployment*). Inoltre, i sensori possono essere in grado di muoversi (*mobile sensor nodes*), o in modo autonomo oppure spinti da forze esterne (vento, acqua, ecc.): ciò permette ai nodi, ad esempio, di cambiare posizione per compensare failure di altri nodi, oppure di cercare aree di interesse.

Una topologia dovrebbe idealmente ottimizzare la fase di deployment iniziale, riducendo i costi di installazione, eliminando il bisogno di qualunque pre-organizzazione e pre-planning, incrementando la flessibilità della rete, e promuovendo la self-organization e la fault tolerance.

Nella fase di post-deployment, possono verificarsi cambiamenti topologici a seguito di:

- cambiamenti di posizione dei nodi o dell'elemento di interesse;
- raggiungibilità dei nodi (dovuta a jamming, rumore, ostacoli, ecc.);
- energia disponibile;
- malfunzionamenti.

4.6 Ambiente applicativo

L'ambiente applicativo forse il fattore che più influisce sulla progettazione delle WSN: applicazioni di natura diversa possono richiedere soluzioni completamente diverse. Infatti, è proprio l'applicazione a determinare i requisiti che devono essere soddisfatti da tutti gli altri fattori.

4.7 Mezzo trasmissivo

Il mezzo trasmissivo più comune sono le onde elettromagnetiche a radiofrequenza, ma per applicazioni particolari si possono usare anche altri mezzi, come ad esempio gli infrarossi e le onde acustiche.

Il tipo di mezzo trasmissivo determina aspetti quali la banda disponibile, i ritardi di comunicazione, il bit error rate, il raggio di copertura dei segnali, ecc.

4.8 Consumo di potenza

Il **consumo di potenza** è un altro fattore di fondamentale importanza, che limita fortemente le applicazioni delle WSN. Infatti, un sensor node ha tipicamente una sorgente di potenza limitata, una batteria che spesso non è né ricaricabile né sostituibile (ad esempio, sarebbe impensabile sostituire le batterie di sensori posizionati su un campo di battaglia). La vita della batteria determina il **lifetime** (tempo di vita) del sensore.

Per cercare di massimizzare il lifetime dei sensor node, bisogna:

- fornire tanta energia quanta è possibile, entro le limitazioni di costo, volume, peso e ricarica, selezionando opportunamente il tipo di batteria da impiegare e sfruttando eventualmente fonti alternative di energia (come il solare, i gradienti di temperatura, le vibrazioni, il rumore acustico e le reazioni nucleari);
- ridurre al minimo possibile il consumo di potenza, in modo che una stessa quantità di energia permetta al nodo di funzionare per un tempo maggiore.

Il consumo di potenza di un sensor node può essere diviso in tre domini: sensing, elaborazione dei dati e comunicazione. Siccome le operazioni che consumano di più sono quelle nel dominio della comunicazione, cioè la trasmissione e ricezione dei dati, è necessario sviluppare dei *protocolli di comunicazione power-aware*.

Ad esempio, ogni sensore deve non solo trasmettere i propri dati, ma anche inoltrare i dati provenienti da altri sensori. Questo è problematico soprattutto per i nodi *di frontiera*, situati vicino alla sink, che si trovano a inoltrare i dati di praticamente tutta la rete, e ciò potrebbe di ridurre di molto il loro lifetime. Una soluzione, quando l'applicazione lo consente, è che ogni nodo usi la propria capacità di processamento per aggregare i propri dati con quelli ricevuti da altri, in modo da trasmettere solo un unico dato aggregato invece di tutti i singoli dati dei vari sensori, sfruttando il fatto l'elaborazione dei dati comporti un consumo molto inferiore rispetto alla trasmissione.