



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DEPARTMENT OF
INFORMATION
ENGINEERING
UNIVERSITY OF PADOVA



**FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE**

Tesi di laurea Triennale

Reti di Sensori Wireless e Standard IEEE 1451

Wireless sensor networking
and the standard IEEE 1451

Studente:
Stefano CICCOTOSTO

Relatore:
Prof. Lorenzo VANGELISTA

*...alla mia famiglia
e ad Anna Isabella...*

Sommario

INTRODUZIONE.....	1
RETI DI SENSORI WIRELESS	3
1.1 COS'È UNA RETE DI SENSORI.....	3
1.2 CARATTERISTICHE PRINCIPALI DI UN WSN	5
1.3 DAI TRASDUTTORI AGLI SMART TRANSDUCERS	6
1.4 CONSIDERAZIONI ENERGETICHE SUI WSN.....	10
1.5 PROTOCOLLI MEDIUM ACCESS CONTROL (MAC).....	12
1.6 PROTOCOLLI DI ROUTING	15
STANDARD IEEE 1451	17
2.1 IEEE 1451 SMART TRANSDUCER.....	19
2.1.1 <i>NCAP – Network Capable Application Processor</i>	22
2.1.2 <i>TIM – Transducer Interface Module</i>	23
2.1.3 <i>Transducer Electronic Data Sheet</i>	27
2.2 FAMIGLIA DEGLI STANDARD IEEE 1451	30
2.2.1 <i>IEEE 1451.0</i>	31
2.2.2 <i>IEEE 1451.1</i>	32
2.2.3 <i>IEEE 1451.2</i>	33
2.2.4 <i>IEEE 1451.3</i>	33
2.2.5 <i>IEEE 1451.4</i>	33
2.2.6 <i>IEEE 1451.5</i>	33
2.2.7 <i>IEEE p1451.6 (proposto)</i>	34
2.2.8 <i>IEEE p1451.7 (proposto)</i>	34
2.3 VANTAGGI DELLO STANDARD IEEE 1451	35
CONCLUSIONI.....	37
BIBLIOGRAFIA.....	39

Introduzione

La sempre più crescente pervasività della tecnologia sta raggiungendo livelli impensabili fino a qualche decade fa, con uno sviluppo che sorprende non tanto dal punto di vista delle prestazioni, di per sé eccezionali, quanto dalle grandi varietà di applicazioni che le moderne tecnologie riescono a semplificare o addirittura a rendere possibili, avendo probabilmente come limitazione solo la fantasia umana.

Ed è grazie a queste innovazioni che si può oggi parlare di case intelligenti, di *smart grid*, di automazione industriale, di sistemi di monitoraggio ambientale e sanitario, di sistemi di prevenzione terremoti, incendi ecc.

L'elemento chiave che ha reso questi sistemi non solo realizzabili, ma anche economicamente fattibili, è sicuramente la possibilità di scambiare informazioni in maniera semplice, affidabile e sicura.

Non deve sorprendere dunque che il settore delle telecomunicazioni stia dirigendo i propri sforzi verso sempre più vaste tipologie di applicazione, ognuna con i suoi requisiti e le sue limitazioni; per questi motivi è necessario un sistema di procedure e modalità di realizzazione di questi sistemi che siano condivisi da ricercatori e produttori col fine di creare i giusti presupposti per uno sviluppo positivo di queste promettenti tecnologie.

Il nostro scopo sarà dunque quello di analizzare dapprima la tecnologia principale che sta dietro tutte queste applicazioni: le reti di sensori, focalizzandoci maggiormente su quelle che operano con comunicazioni wireless essendo quelle che maggiormente trovano utilizzo.

Descriveremo la loro struttura e il loro sviluppo, finendo col definire le problematiche di cui soffrono per poter analizzare in seguito la famiglia degli standard IEEE 1451, che si prefigge di risolvere problemi di compatibilità e di connessione tra i vari dispositivi che formano le attuali reti di sensori.

Reti di sensori wireless

Negli ultimi anni le tecnologie di rete wireless hanno svolto un ruolo fondamentale nello sviluppo di una vasta gamma di applicazioni aventi la necessità di rendere facilmente condivisibile l'informazione.

Infatti, le tecnologie cablate permettono di creare reti con una specifica topologia e richiedono dunque un notevole lavoro per la loro installazione.

Al contrario le tecnologie wireless permettono di creare reti *ad hoc* a basso costo, anche grazie al modesto lavoro d'installazione necessario, garantendo una buona scalabilità del sistema e una facile riconfigurazione.

Queste ottime caratteristiche hanno facilitato lo sviluppo di svariate applicazioni che, grazie all'utilizzo di dispositivi in grado di interagire con l'ambiente circostante e controllabili quasi direttamente dall'utente esterno, passano dall'automazione di sistemi industriali e domestici al monitoraggio ambientale fino a sistemi di sicurezza e applicazioni mediche.

In questo capitolo analizzeremo i dispositivi che compongono queste reti wireless, evidenziando gli elementi fondamentali che hanno reso questa tecnologia una realtà con ampi margini di sviluppi futuri.

1.1 Cos'è una rete di sensori

Una rete di sensori wireless (*Wireless Sensor Network* - WSN) consiste in una rete formata da dispositivi, normalmente con ridotta complessità e grandezza, chiamati *nodi sensori* che possono raccogliere informazioni dall'ambiente circostante e comunicarle attraverso vari mezzi di

comunicazione verso nodi di calcolo che possono servirsene localmente o in alternativa trasmetterle attraverso l'uso di un *gateway* verso altre reti (tipicamente internet).^[1]

Gli elementi base di un WSN sono dunque i sensori, i nodi di calcolo e i gateway. Normalmente i nodi di calcolo e i gateway sono dispositivi più complessi dei nodi sensori a causa dell'elevato numero di funzionalità cui devono provvedere. Il sensore è dunque il più semplice dispositivo del network, e solitamente il numero di sensori è notevolmente più grande rispetto al numero dei restanti dispositivi presenti nella rete; è di fondamentale importanza dunque mantenere la loro dimensione e soprattutto il loro costo più contenuto possibile.

Un ulteriore fattore critico per un sensore è il consumo di energia, in quanto spesso questi dispositivi sono alimentati da batterie a causa della facilità d'installazione che comporta questa scelta.

Perciò al fine di consentire alla rete di operare per un tempo ragionevole, denominato *network lifetime*, i nodi sensori devono essere in grado di sfruttare adeguatamente l'energia fornita dalle batterie per un periodo sufficiente, che in molte applicazioni è dell'ordine degli anni.

Dunque anche il consumo di energia rappresenta un fattore di merito importante nella progettazione di tali dispositivi, che può essere raggiunto utilizzando tecniche energeticamente efficienti sia nella fase di trasmissione sia in quella di elaborazione dell'informazione, come ad esempio la cooperazione tra i nodi nella consegna dell'informazione al nodo di calcolo.

Tale cooperazione dipenderà dalla densità di sensori e nodi di calcolo presenti in una determinata area che definisce la connettività e raggiungibilità dei nodi della rete, oltre che alla copertura dello spazio monitorato (probabilità che un evento che si verifichi venga individuato da almeno un sensore).

In figura 1.1 è riportato un esempio di WSN, in cui sono riportati i collegamenti tra i vari nodi della rete e in particolare tra sensori o attuatori e i nodi di calcolo (*sink*), che possono essere diretti (*single-hop*) o separati da altri nodi sensori che si prendono carico della ritrasmissione del pacchetto verso il sink più prossimo (*multi-hop*).

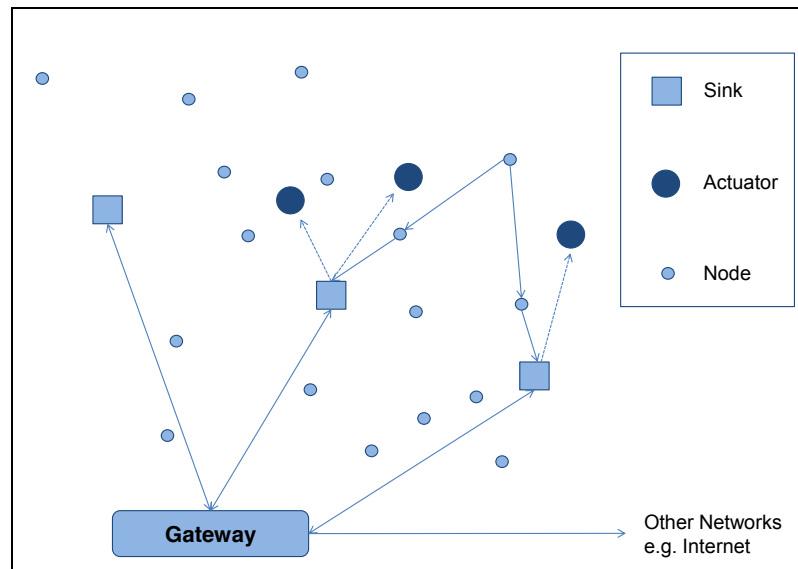


Figura 1.1: topologia di una rete di sensori e attuatori

Possiamo definire dunque un WSN come una rete di nodi che cooperano al fine di monitorare una determinata area di interesse ed eventualmente controllarla, consentendo un'interazione tra l'utente esterno e l'ambiente circostante.^[1]

1.2 Caratteristiche principali di un WSN

Le reti di sensori si differenziano dalle altre tipologie di rete per obiettivi, requisiti e capacità; è bene dunque focalizzare dal principio il contesto in

cui ci troviamo per meglio comprendere i motivi di molte scelte tecniche e logiche.

Dalle considerazioni fatte in precedenza possiamo dedurre quali sono le caratteristiche desiderabili in una rete di sensori:

- Scalabilità rispetto al numero di nodi della rete
- Auto-organizzazione
- Riconfigurazione automatica
- Efficienza energetica
- Ridotta manutenzione
- Accettabile grado di comunicazione tra i nodi
- Bassa complessità
- Basso costo.

Risulta evidente che questi requisiti sono necessari per rendere queste reti facilmente installabili e utilizzabili anche da un utente poco esperto, richiedendo la minor quantità di manutenzione possibile.

Infatti nel contesto in cui operiamo non sono richieste tecnologie avanzate, visto che utilizziamo sistemi di per sé semplici ma che diventano complessi nel momento in cui il numero di nodi della rete cresce, raggiungendo talvolta l'ordine delle centinaia; è per tale motivo che l'ostacolo principale che tali reti pongono non sono tanto tecnologici ma di effettiva praticità di utilizzo e di fattibilità in ambienti ostili alla loro realizzazione che implica quindi anche il costo economico relativo a installazione e manutenzione.

1.3 Dai trasduttori agli Smart Transducers

Dopo aver individuato il punto debole di queste reti, ovvero i nodi sensori, analizziamo nel dettaglio le loro caratteristiche e le loro limitazioni, provando a fare qualche considerazione sulle possibili scelte tecniche adottabili.

Partiremo dalla concezione classica di trasduttore per arrivare ai cosiddetti trasduttori intelligenti, per mettere in evidenza le innovazioni che hanno contribuito a una svolta decisiva nello sviluppo delle reti di sensori.

Un trasduttore è definito come un dispositivo in grado di convertire l'energia da una forma a un'altra. A seconda della forma di partenza e di quella ottenuta possiamo distinguere due tipi di trasduttore:

- Nel caso in cui il trasduttore generi un segnale elettrico in risposta ad un segnale di tipo fisico, chimico o biologico, esso è denominato sensore.
- Al contrario, è definito attuatore un dispositivo in grado di convertire un segnale elettrico in uno fisico.

Physical property	Sensor	Output
Temperature	Thermocouple	Voltage
	Silicon	Voltage/Current
	Resistance temperature detector (RTD)	Resistance
	Thermistor	Resistance
Force/Pressure	Strain Gauge	Resistance
	Piezoelectric	Voltage
Acceleration	Accelerometer	Capacitance
Flow	Transducer	Voltage
	Transmitter	Voltage/Current
Position	Linear Variable Differential Transformers (LVDT)	AC Voltage
Light Intensity	Photodiode	Current

Figura 1.2: esempi di sensori implementabili.

Un sensore ha perciò il compito di misurare una grandezza che può essere una temperatura, una pressione o un peso e così via, ed è in grado di

generare un impulso elettrico di tensione o di corrente proporzionale alla grandezza misurata mentre un attuatore compie un lavoro inverso, trasformando un segnale elettrico che riceve come input e convertendolo in un'altra grandezza fisica che può essere il flusso di un fluido o la velocità di un motore^[2].

Spesso, tuttavia, il segnale generato ha bisogno di varie operazioni di condizionamento per poter acquisire un significato dal punto di vista ingegneristico.

Per tale motivo al trasduttore fisico vero e proprio viene associata un'unità di calcolo in grado di compiere operazioni sul segnale ad opera di amplificatori, filtri, convertitori A/D ecc. al fine di renderle utilizzabili dall'utente che ne fa richiesta.

Infine il crescente bisogno di flessibilità richiesta alle reti di sensori ha richiesto l'utilizzo di comunicazioni senza fili che rendono necessario l'utilizzo di un apposito modulo di comunicazione che gestisca in maniera semplice ed efficace le comunicazioni tra il trasduttore e l'unità di calcolo.

Uno *smart transducer* è pertanto il risultato della combinazione di un sensore o attuatore con un'unità di elaborazione, in grado di processare il segnale acquisito, e un'interfaccia di comunicazione in un unico dispositivo.

Otteniamo dunque la struttura di figura 1.3, in cui possiamo notare i vari blocchi elencati: un microprocessore gestisce tutti i *task* presenti; uno o più sensori collezionano un insieme di misure dall'ambiente circostante; una memoria è integrata nel dispositivo al fine di memorizzare i dati relativi alle sue specifiche tecniche, i dati raccolti dal sensore o quelli necessari al microprocessore per gestire le proprie funzioni di calcolo;

Un radiotrasmettitore si occupa infine di gestire le comunicazioni con il resto della rete. Tutti questi dispositivi sono alimentati da una batteria.

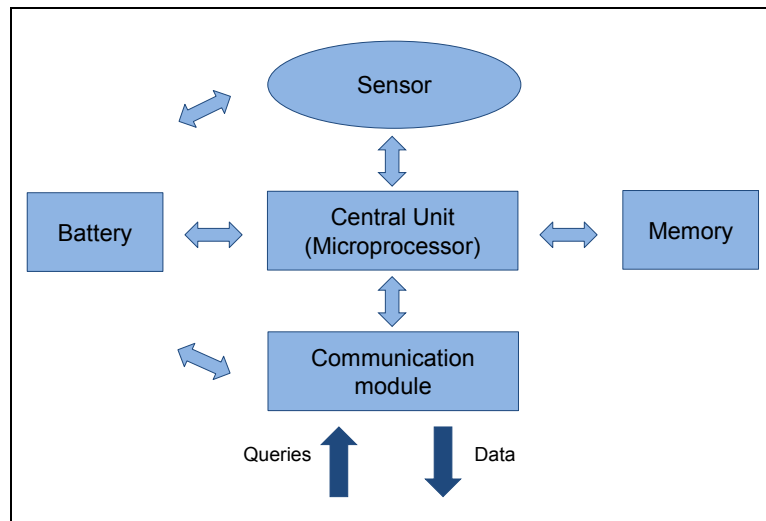


Figura 1.3: unità fisiche costituenti un trasduttore intelligente

Volendo invece rappresentare il sistema da un punto di vista funzionale otteniamo la schematizzazione di figura 1.4.

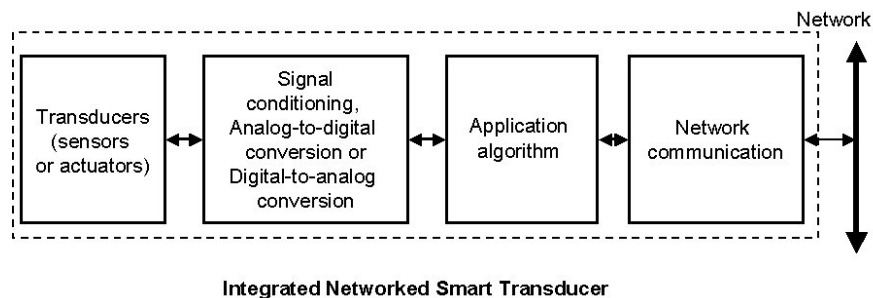


Figura 1.4: schematizzazione funzionale di un trasduttore intelligente

Dapprima il sensore rileva la grandezza da osservare e genera un output analogico che viene manipolato e convertito in un segnale digitale. Il segnale numerico ottenuto può essere elaborato da un'apposita unità di calcolo presente nel microprocessore e inviato attraverso un'interfaccia di

comunicazione verso un sistema remoto attraverso una qualunque tipologia di rete.

Nel caso di un attuatore vale il procedimento inverso: un'unità operativa remota trasmette attraverso l'interfaccia di comunicazione dei comandi verso l'attuatore.

1.4 Considerazioni energetiche sui WSN

Come già discusso in precedenza, il fattore fondamentale per rendere le applicazioni che utilizzano una WSN facilmente gestibili e quindi permettere il loro sviluppo è l'efficienza energetica, legata alla necessità di prolungare il *network lifetime* più a lungo possibile.

Generalmente i nodi di calcolo e i gateway sono connessi alla rete elettrica, perciò le considerazioni sull'efficienza energetica sono limitate ai soli nodi sensori.

Dunque, considerando un sensore, qual è l'attività responsabile maggiormente del consumo di energia?

Come mostrato in precedenza un nodo sensore è fondamentalmente composto da una batteria, un microprocessore, il trasduttore vero e proprio e una ricetrasmittente. Nel bilancio energetico del sistema è possibile trascurare il contributo del sensore rispetto al consumo del modulo della ricetrasmittente e del microprocessore, che necessitano un'accurata progettazione al fine di raggiungere il giusto compromesso tra prestazioni del sistema e consumo energetico.

Considerando le attività svolte dal microprocessore, lo svolgimento di algoritmi di elaborazione dati potrebbe alleggerire notevolmente la mole di dati da trasmettere, eliminando eventuali informazioni superflue, con una conseguente diminuzione di trasmissioni da effettuare.

D'altra parte alcune operazioni potrebbero essere inutilmente lunghe o essere impraticabili a causa delle restrizioni poste dal processore stesso e dalla memoria a disposizione.

E' importante dunque determinare con cura la distribuzione delle operazioni di calcolo sull'informazione tra il nodo sensore e il nodo di calcolo.

Focalizzando l'attenzione alle attività di comunicazione del sensore, potremmo pensare intuitivamente che l'attività che maggiormente è responsabile del consumo di energia sia la fase di trasmissione piuttosto che quella di ricezione.

Ciò può essere vero considerando uguali tempi di osservazione, ma si deve tener conto del fatto che mentre i periodi di trasmissione sono ben determinati e noti a priori al trasduttore, la stessa cosa non è vera per i periodi di ricezione, in quanto il trasduttore potrebbe rimanere per lunghi periodi in attesa di un segnale dalle unità di calcolo nel caso in cui non vi sia una programmazione dei tempi di trasmissione. Per questo motivo la fase di ricezione potrebbe essere di gran lunga più dispendiosa di quella di trasmissione.

Una prima soluzione nella fase di trasmissione può essere quella di utilizzare un algoritmo di *routing multi-hop*, cioè affidando ad altri nodi sensori il pacchetto di informazione da trasmettere lasciando a loro il compito di recapitarlo al nodo di calcolo o di affidarlo a loro volta ad altri nodi della rete.

Infatti, un dimezzamento della distanza di comunicazione riduce il consumo di energia fino a $\frac{1}{4}$ del totale. Il pacchetto di dati è dunque instradato attraverso la rete con una serie di piccole trasmissioni a basso costo energetico.

Bisogna tenere a mente in ogni caso che il periodo di trasmissione è necessario solo nel momento in cui è presente una determinata quantità di dati da trasmettere. Minore è la quantità di dati da trasmettere e minore sarà la durata della trasmissione, con conseguente aumento del tempo di vita del sensore. Questa considerazione ci suggerisce di evitare nella scelta dei protocolli comunicazione quelli che aggiungono notevoli ridondanze all'informazione prima della sua trasmissione.^[1]

1.5 Protocolli Medium Access Control (MAC)

Generalmente l'efficienza energetica di una rete può essere raggiunta a vari livelli dello stack protocollare, tuttavia relativamente ai WSN è il *Data Link Layer*, e in particolare i suoi protocolli di comunicazione, a svolgere un ruolo decisivo nel determinare la quantità di energia assorbita dalla rete.

Il sottolayer MAC costituisce la parte più bassa del *Data Link Layer* e opera a capo del *Physical layer*, gestendo le trasmissioni e le ricezioni radio su un mezzo fisico di comunicazione condiviso da più entità, fornendo un flusso di dati stabile verso i layer sovrastanti.

I requisiti da soddisfare nella progettazione di un protocollo MAC di un WSN si differenziano notevolmente da quelli di un tradizionale protocollo MAC per reti di computer, dal momento che mentre per questi ultimi l'obiettivo principale è di massimizzare il *throughput*, i protocolli di comunicazione di WSN mirano a soddisfare i seguenti ulteriori requisiti:

- Risparmio energetico
- Adattabilità
- Scalabilità
- Equità
- Latenza

Tuttavia come notato in precedenza ciò non è sufficiente a garantire un notevole risparmio di energia, poiché in ricezione il sensore può consumare addirittura più energia che non in trasmissione.

I fenomeni che devono essere minimizzati nel progetto dei protocolli di comunicazione sono invece^[8]:

- *Overhearing*: avviene quando in un canale *unicast* condiviso da più nodi un pacchetto è ricevuto oltre che dal destinatario anche da altri nodi che in quel momento erano in fase di ricezione, con conseguente spreco di energia;
- *Idle listening*: un nodo rimane per un lungo periodo in modalità di ricezione senza che avvenga nessuna trasmissione a lui destinata;
- Collisioni: può capitare che due nodi trasmettano contemporaneamente e alla stessa frequenza due pacchetti di dati, i quali, molto probabilmente, risulteranno indecifrabili a causa dell'interferenza prodotta dalla sovrapposizione delle due trasmissioni;
- Ridondanza eccessiva: i pacchetti di dati trasmessi dai nodi sensori sono spesso di ridotte dimensioni, per cui un protocollo di comunicazione che aggiunga un'eccessiva ridondanza all'informazione costituirebbe un consumo di energia inaccettabile dal sistema.

Dalle considerazioni fatte finora possiamo analizzare qualche tradizionale protocollo di comunicazione per evidenziare possibili pregi e difetti di una sua implementazione in un WSN.

Il protocollo ALOHA è certamente uno dei più semplici da implementare giacché i nodi della rete operano senza alcun coordinamento, trasmettendo dati in istanti casuali confidando nel fatto che gli altri nodi della rete non stiano trasmettendo, mentre restano in ascolto del canale per il resto del tempo. Ovviamente nonostante questo protocollo sia

ottimo dal punto di vista della semplicità di funzionamento, esso diventa altamente inefficiente al crescere del numero di nodi connessi alla rete dovuto al rapido aumento delle collisioni che occorrono tra pacchetti, oltre al fatto che ogni nodo è costantemente in modalità di ricezione quando non trasmette.

Stesso discorso vale per i protocolli di comunicazione che utilizzano meccanismi di *channel sensing*: quelli cioè in cui il modulo di comunicazione rimane in ascolto del canale per determinare se siano in corso altre trasmissioni da altri dispositivi trasmettendo il pacchetto nel momento in cui sia libero da altre comunicazioni.

Perciò un protocollo come il *carrier sensing multiple access* (CSMA) è potenzialmente energeticamente inefficiente.

Un approccio totalmente differente è utilizzato da protocolli programmati in cui viene assegnato a ogni nodo un determinato intervallo di tempo (TDMA - *time division multiple access*), di frequenza (FDMA - *frequency division multiple access*) o di codice (CDMA - *code division multiple access*), che riducono efficacemente le collisioni di pacchetti e i ritardi di accesso al canale, aumentando però la complessità del sistema dovuto alla gestione degli spazi assegnati ai vari nodi, che possono essere fissi o cambiare dinamicamente, attraverso un'apposita rete di *signaling*.

In conclusione un utilizzo di protocolli classici di comunicazione non riesce a soddisfare completamente i requisiti richiesti dalle reti di sensori, dunque vi è la necessità di definire protocolli ad hoc basati sull'utilizzo congiunto delle tecniche sopra discusse ma che tengano altresì conto delle limitazioni cui i sensori sono affetti allo scopo di ottimizzare il sistema complessivo.

1.6 Protocolli di Routing

Abbiamo già discusso in precedenza come un'attenta gestione dei protocolli di routing all'interno della rete possa essere un'ottima mossa per ottenere l'efficienza energetica che desideriamo.

Bisogna pertanto considerare le caratteristiche peculiari di queste reti che rendono spesso inefficienti i protocolli normalmente utilizzati per altri tipi di reti come quelle telefoniche e agire di conseguenza puntando sempre all'obiettivo primario che è il risparmio energetico.

La prima caratteristica che si nota osservando la topologia delle reti in esame è la centralità del nodo di calcolo rispetto ai nodi sensori, che comporta un flusso di dati esclusivamente tra un nodo sensore e il nodo di calcolo e rende perciò marginale l'utilizzo d'identificatori dei nodi per l'instradamento dei pacchetti di informazione.

Di conseguenza, anche il traffico di dati risulterà fortemente asimmetrico avendo i nodi di calcolo che ricevono pacchetti da tutti i nodi sensori ad esso collegati; il traffico dati diretto verso i nodi sensori potrà essere però molto più importante rispetto al flusso dati diretto verso il nodo di calcolo: ad esempio in un sistema di misurazioni ambientali può essere accettabile che qualche pacchetto relativo a una misura vada perduto essendocene molte altre a seguire mentre potrebbe non esserlo la perdita di un comando di controllo inviato ai nodi sensori.

Osservando invece le limitazioni fisiche imposte ai nodi periferici della rete, memorizzare numerose informazioni su percorsi e sui restanti nodi della rete può non essere una strada percorribile, così come implementare sofisticati calcoli di percorsi. E' necessario a tal proposito una tattica di elaborazione distribuita, avendo possibilmente a disposizione solamente le informazioni dei nodi che si trovino nelle immediate vicinanze.

Siccome poi la scelta del percorso dovrà seguire un criterio di risparmio energetico e quindi essere costituito come accennato in precedenza da tante piccole trasmissioni a bassa energia piuttosto che da un'unica dispendiosa trasmissione o comunque da un bilancio cumulativo dell'energia utilizzata per la consegna del pacchetto, algoritmi che utilizzino il percorso più breve non saranno sempre adatti alle nostre esigenze; d'altra parte, l'utilizzo di connessioni poco affidabili potrebbe causare una trasmissione errata dell'informazione e quindi rendere necessaria una ritrasmissione con conseguente spesa inutile di energia, così come la scelta continua di un particolare nodo per instradare efficientemente il flusso dati farà certamente ridurre drasticamente le sue risorse energetiche con la possibilità di interdire una parte di rete nel momento in cui il nodo in questione dovesse spegnersi.

Infine, una buona politica energetica passa anche dal ridurre all'essenziale l'informazione trasmessa: inviare dati aggregati come somme o medie di varie misure può aiutare a ridurre la grandezza e il numero dei pacchetti da trasmettere, giacché gestire la ridondanza presente può non essere sempre fattibile poiché a causa della alta densità di nodi e della relativa interferenza che si crea, anche a causa dell'ambiente spesso ostile oppure del cambiamento delle condizioni operative, e infine la possibilità della perdita di alcuni nodi che potrebbero disattivarsi per mancanza di energia, le connessioni sono spesso poco affidabili e non compatibili con un'accettabile robustezza che si potrebbe chiedere al sistema.

Resta comunque il fatto che a causa delle grandi varietà di applicazioni che trova questo tipo di tecnologie, i fattori da tenere in considerazione e le relative soluzioni tecniche possono variare da caso a caso vanno studiati di conseguenza.

Standard IEEE 1451

Il crescente sviluppo delle reti di sensori nel corso degli anni ha mostrato varie limitazioni ad un suo utilizzo diffuso, perciò negli ultimi anni sono stati redatti una serie di documenti dall'*Institute of Electric and Electronic Engineers* (IEEE) con lo scopo di creare un'interfaccia standard che renda possibile l'interoperabilità di dispositivi prodotti da aziende differenti.

La famiglia degli standard IEEE 1451 nasce perciò dall'esigenza di definire un insieme di interfacce di comunicazione che siano comuni, indipendenti dalla tipologia di network in cui operano e indipendenti dalle aziende produttrici dei dispositivi, per la connessione di trasduttori intelligenti, microprocessori e unità di calcolo in una rete capace di auto organizzarsi rendendo così la sua gestione trasparente all'utente esterno^[9].

I principali obiettivi di un simile lavoro sono^[3]:

- Possibilità di installare, rimuovere o aggiornare i dispositivi della rete in modalità *plug & play* , ovvero senza una precisa procedura di installazione o configurazione richiesta all'utente esterno.
- Definizione di un *data sheet* elettronico standard contenente informazioni indispensabili per interagire con il trasduttore in maniera corretta, anche al di là della semplice gestione della raccolta dati.
- Possibilità di utilizzo di vari mezzi fisici di comunicazione sia cablati che wireless, attraverso i numerosi standard di comunicazione IEEE.

- Facilità delle operazioni di controllo, configurazione e calibrazione dei dispositivi attraverso l'adozione di un modello comune nella gestione dei dati.
- Favorire l'integrazione di trasduttori legati a tecnologie obsolete in reti di trasduttori intelligenti.
- Rendere più economica la produzione di tali dispositivi riducendo la complessità legata all'implementazione di più sistemi di comunicazione tra i vari dispositivi.

Esso non pone dunque restrizioni sul condizionamento del segnale, sugli schemi dei processi applicativi, sulle conversioni analogico/digitale, sui microprocessori, sui protocolli o mezzi di comunicazione, prevedendo l'utilizzo di apposite tabelle di dati aventi un formato standard acquisibili automaticamente dall'host remoto che interagisce sul sensore per rendere possibile una corretta acquisizione dei dati misurati.

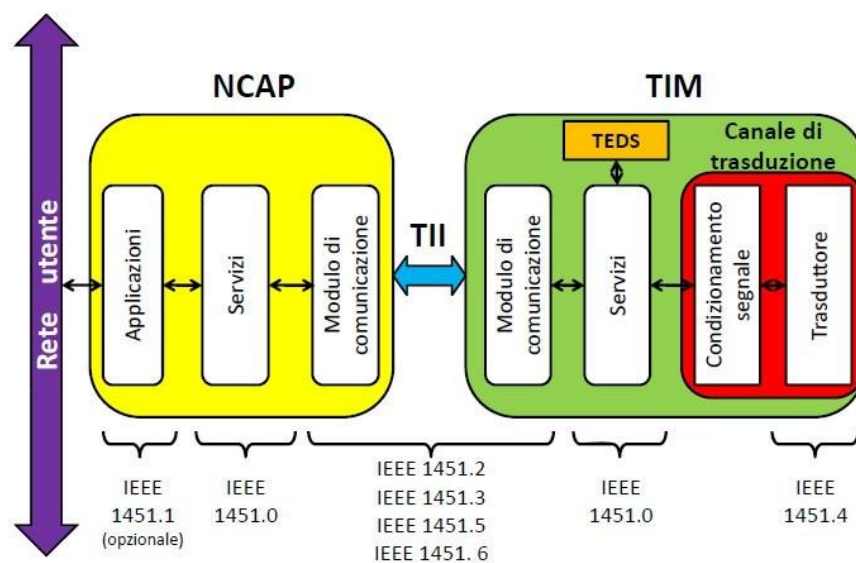


Figura 2.1: Rappresentazione dei componenti descritti dallo standard

2.1 IEEE 1451 Smart Transducer

La necessità di definire un modello comune per gli *smart transducers* nasce dall'esigenza di favorire l'integrazione e la comunicazione tra numerosi dispositivi, anche prodotti da aziende differenti.

Lo *smart transducer* definito dallo standard IEEE 1451 si differenzia da un normale trasduttore intelligente dal fatto di possedere funzionalità aggiuntive a quelle sufficienti per un suo corretto funzionamento. Queste funzionalità hanno lo scopo di favorire l'integrazione del dispositivo nella rete attraverso capacità quali auto-identificazione, auto-descrizione, auto-diagnosi, auto-calibrazione, determinazione di posizione e tempo, funzioni di *data processing*, utilizzo di diversi protocolli di comunicazione ecc.

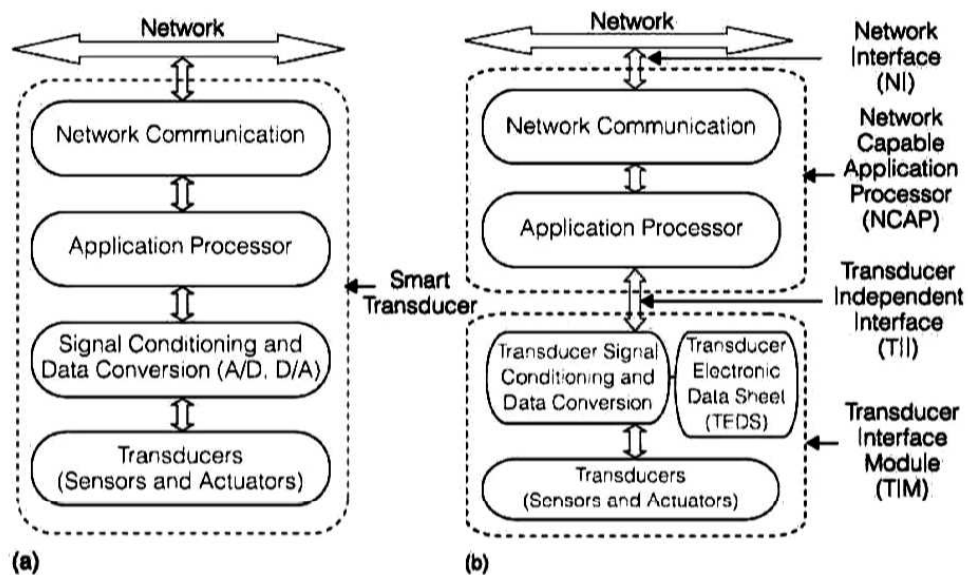


Figura 2.2: confronto tra l'architettura di uno smart transducer definito dallo standard e quella di uno classico.

Lo standard definisce inoltre un'architettura ben definita del trasduttore che risulta leggermente differente dalla normale architettura di un trasduttore classico. Notiamo subito una suddivisione in due elementi principali: un'unità di calcolo in grado di comunicare con un network

esterno (*Network Capable Application Processor - NCAP*) e un modulo contenente uno o più trasduttori e blocchi di conversione ed elaborazione dati (*Transducer Interface Module - TIM*). La trasmissione dell'informazione tra i due blocchi è garantita da un'interfaccia indipendente del trasduttore (*Transducer Independent Interface - TII*) che può essere realizzata attraverso vari protocolli di comunicazione sia cablati che wireless. L'interazione tra NCAP e TIM è infine favorita dall'utilizzo di un'apposita struttura dati standard con cui il TIM riesce a fornire una descrizione esauriente della sua struttura al NCAP.

Nella figura 2.3 troviamo due possibili applicazioni dell'IEEE 1451 in un sistema di misurazione e controllo distribuito^[10]:

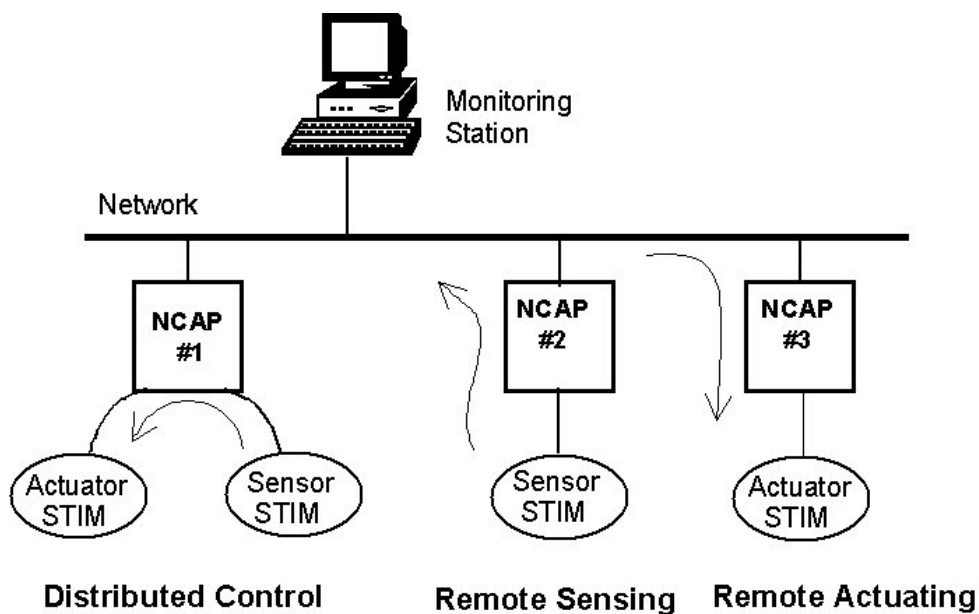


Figura 2.3: possibili organizzazioni di reti IEEE 1451

Nella prima situazione abbiamo sensore e attuatore collegati allo stesso NCAP (#1), il quale opera un'azione di controllo locale, come ad esempio il settaggio di un termostato in risposta alla misura fatta da un termometro.

Contemporaneamente può inviare dati misurati e descrivere la situazione corrente ad una stazione di monitoraggio remota.

Nella seconda situazione, sensore e attuatore sono connessi a due NCAP distinti (#1 e #2) che possono essere anche distanti fisicamente e che comunicano attraverso la rete, come nel caso di un teleallarme che viene attivato da un sensore di scasso.

In generale possiamo distinguere tre principali applicazioni in cui l'utilizzo dello standard IEEE 1451 si rivela un elemento fondamentale per il funzionamento ottimale del sistema^[2]:

- **Monitoraggio e controllo remoto:** in un sistema di monitoraggio costituito da uno o più sensori, il NCAP può, attraverso una connessione ad una rete esterna qual è internet, inviare i dati rilevati dai vari sensori della rete verso una qualunque stazione di monitoraggio connessa alla stessa rete.
Similmente un NCAP connesso ad una serie di attuatori può ricevere comandi da un *host* remoto permettendo l'utilizzo degli attuatori attraverso la rete.
- **Monitoraggio e controllo distribuito:** è la situazione in cui i TIM sono costituiti sia da trasduttori che da attuatori; essi sono in grado perciò di operare localmente e autonomamente funzioni di controllo e misura seguendo le indicazioni fornite al NCAP attraverso la rete.
- **Monitoraggio e controllo collaborativo:** si ha in presenza di più NCAP, ognuna connessa a uno o più TIM con sensori e attuatori, che interagendo tra di loro riescono a condurre operazioni di controllo distinte attraverso una collaborazione mutua o una sincronizzazione logica o temporale.

Vediamo ora in dettaglio le singole parti fisiche descritte dallo standard.

2.1.1 NCAP – Network Capable Application Processor

Un NCAP è un dispositivo disposto all'interno della rete tra il TIM e il network esterno che si occupa di gestire efficientemente il traffico dati da e verso i TIM ad esso collegato e di rendere disponibile ad un utente esterno i dati acquisiti attraverso la rete esterna.

Come suggerito dallo stesso acronimo, un NCAP è costituito da un'interfaccia di rete in grado di connettersi ad un network esterno come internet attraverso un gateway, e da un processore applicativo in grado di svolgere tutte le attività delegate al dispositivo.

Una volta acquisito il TEDS dal TIM, il NCAP determina il massimo bit rate sopportato dal modulo di comunicazione del TIM nelle trasmissioni, quanti canali contiene il TIM, e il formato dei dati di ogni trasduttore.

Conosce inoltre cosa ogni trasduttore sta misurando e quale funzione di calibrazione è utilizzata per le misurazioni.

Un NCAP può avviare una misurazione o intraprendere un'azione inviando un apposito segnale di trigger verso il TIM, il quale risponde attraverso un segnale di *acknowledgement* una volta terminato il processo. Può essere inoltre interrotto a sua volta dal TIM al verificarsi di errori quali problemi hardware, errori di calibrazione o anomalie evidenziate dai test di controllo effettuati dal TIM.

L'accesso ad un NCAP da rete utente può avvenire attraverso l'utilizzo di un protocollo di comunicazione HTTP, utilizzato nello scambio di informazioni in internet e basato su una connessione di tipo TCP.

Essendo un protocollo di tipo *client/server*, il NCAP dovrà ospitare al suo interno il server HTTP, il quale rimarrà costantemente in ascolto nell'attesa di comunicazioni da parte dei client HTTP remoti, utilizzati dall'utente per accedere al NCAP.

Il NCAP fornirà i dati verso l'utente remoto in uno dei seguenti formati:

- Formato XML;
- Formato HTML (pagina web);
- Formato testuale;

Un NCAP può quindi svolgere sia una funzione di controllo dei nodi della rete, comunicando altresì con gli altri NCAP presenti nella rete, sia una funzione d'interfacciamento con l'utente esterno attraverso protocolli *client/server*.^[4]

2.2.2 TIM – Transducer Interface Module

Il TIM è un dispositivo a cui è affidata la gestione del trasduttore, il collezionamento dei dati e la loro trasmissione verso i nodi di calcolo.

Essi sono dunque i nodi terminali della rete e necessitano di un *host* remoto per la loro gestione .

Un singolo TIM contiene al suo interno quattro blocchi principali: un'interfaccia di comunicazione che gestisce il trasferimento dei dati dal trasduttore al NCAP e viceversa, un microprocessore in grado di compiere operazioni di condizionamento del segnale acquisito da uno o più trasduttori che rappresentano il terzo blocco principale, e infine una zona di memoria ha il compito di conservare i data sheet elettronici che

consentiranno al dispositivo di interfacciarsi correttamente con gli altri nodi della rete.

Spesso è definito come canale di trasduzione la parte del TIM comprendente il trasduttore fisico e tutta l'elettronica necessaria al condizionamento del segnale (amplificatori/attenuatori, filtri, convertitori ADC/DAC, ecc.).

Un TIM può avere quindi più canali di trasduzione, che vengono classificati dallo standard IEEE 1451.0 in:

- Sensori
- Sensori ad eventi
- Attuatori

In presenza di più trasduttori possiamo distinguere due insiemi di canali di trasduzione:

- Gruppo di controllo: composto da un canale di trasduzione principale e uno o più canali secondari che hanno il compito di acquisire informazioni aggiuntive sul funzionamento del canale principale.
- Gruppo vettoriale: non vi è una relazione gerarchica tra i canali di trasduzione.

La struttura dati di un canale di trasduzione è costituita da un data set contenente i campioni raccolti dal sensore o nel caso di un attuatore i dati da fornire provenienti dal NCAP. Il data set viene definito da tre parametri contenuti nel TEDS che sono il numero massimo di campioni memorizzabili dal data set (*maximum data repetition*), l'unità di misura del campionamento (*series unit*) e l'ampiezza dell'intervallo di campionamento che non è necessariamente temporale (*series increment*).

Un ulteriore aspetto che caratterizza un canale di trasduzione è la modalità di campionamento. [5]

Lo standard IEEE 1451.0 definisce tre differenti modalità di base:

- Modalità *Trigger-initiated*

In questa modalità il canale di trasduzione è inizialmente inattivo.

La ricezione di un comando da parte del NCAP avvia il processo di acquisizione dati nel caso di un nodo sensore e il processo di elaborazione nel caso di un nodo attuatore.

Il processo termina quando tutti i campioni nel *data set* sono stati processati.



Figura 2.4: schematizzazione temporale di un campionamento Trigger-initiated

- Modalità *Free-running*

In questa modalità il canale di trasduzione è costantemente attivo. Ciò comporta un'acquisizione continua di campioni da parte dei sensori e un'azione specifica da parte degli attuatori in accordo all'ultimo comando ricevuto dal dispositivo.

Vi sono a questo punto due possibilità nei sensori per questa modalità: con *pre-trigger* e senza *pre-trigger*.

Nel primo caso i campioni acquisiti dal sensore vengono continuamente memorizzati in un apposito buffer circolare che mantiene in memoria solo i campioni più recenti, sovrascrivendoli a quelli più vecchi. Alla ricezione del comando di trigger, la memorizzazione si sposta nel data set vero e proprio fino al suo completamento, che comporta la trasmissione di tutti i campioni memorizzati prima e dopo il comando di trigger.

Nel secondo caso i dati acquisiti non vengono memorizzati fino alla ricezione del comando di trigger, che abilita il salvataggio nel data set fino al suo riempimento con successiva trasmissione.

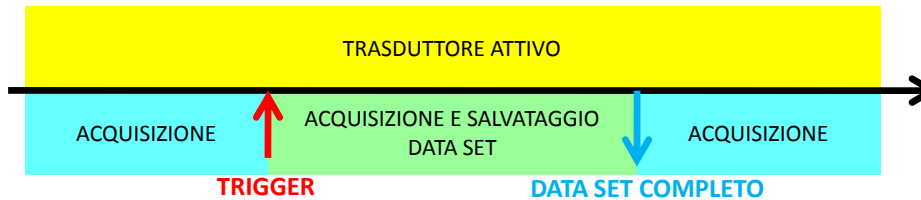


Figura 2.5: schematizzazione temporale di un campionamento Free-running

- L'ultima modalità è chiamata *Continuous Sampling* poiché il trasduttore non termina l'elaborazione dei dati al completamento del data set, ma continua in altri data set, se disponibili, o inizia la sovrascrittura dei data set meno recenti. Questa tecnica richiede perciò che il sensore possenga dei buffer di memoria multipli per poter gestire correttamente tutte le informazioni.

Infine lo standard IEEE 1451.0 definisce le modalità con cui viene trasmesso il data set, che sono:

- *On Command*: un data set viene trasmesso dal canale di trasduzione solo dopo aver ricevuto un comando di lettura;
- *Streaming*: il canale di trasduzione gestisce autonomamente la trasmissione dei dati ed è denominato *Buffer Full* se l'invio avviene al completamento di un data set, mentre è detto *Fixed Interval* quando l'invio avviene ad istanti di tempo regolari, senza tener conto della grandezza del data set.

2.2.3 Transducer Electronic Data Sheet

Un importante elemento definito dallo standard IEEE 1451 è il TEDS (*Transducers Electronic Data Sheets*), ovvero una versione elettronica dei *data sheet* dei dispositivi.

Per ogni sensore o attuatore è infatti prevista una zona di memoria non volatile appartenente al TIM che memorizza al suo interno tutte le informazioni necessarie per identificare e configurare correttamente il dispositivo, nonché le informazioni riguardanti il funzionamento di ogni canale di trasduzione.

Generalmente i TEDS sono memorizzati in memorie di tipo EEPROM, in quanto generalmente i dati contenuti in esso subiscono variazioni nel corso della vita del sensore sia a causa di aggiornamenti e sia per adattarsi all'ambiente in cui devono operare e ai cambiamenti delle condizioni operative.

E' prevista la possibilità di definire TEDS virtuali, non memorizzati cioè nel TIM (ad esempio nel NCAP), che devono essere perciò associati al relativo canale di trasduzione.

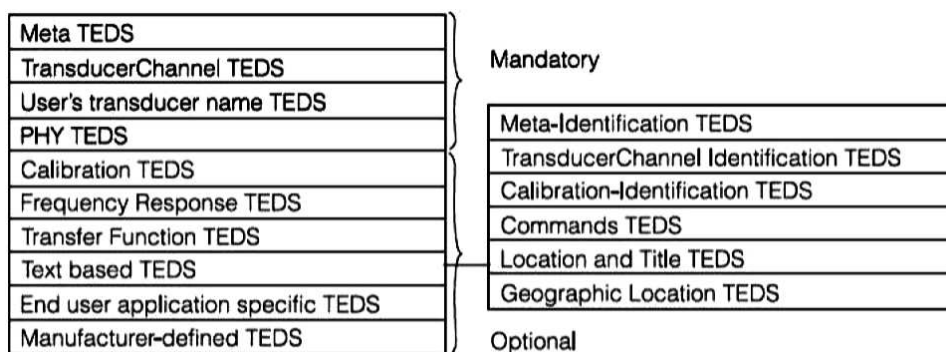


Figura 2.6: Tipologie di TEDS previste dallo standard

Tra le varie informazioni presenti in un TEDS figurano l'identificazione del produttore, la sensibilità del sensore e i suoi intervalli di misura, i dati necessari per la calibrazione del dispositivo ecc.

In figura 2.6 è riportata la struttura di un TEDS suddivisa nei vari sottogruppi previsti dallo standard, di cui quattro sono obbligatori e i restanti facoltativi^[11].

Struttura di un TEDS

Ogni TEDS è costituito da tre campi fondamentali: il primo specifica la lunghezza del TEDS stesso, ha dimensione fissa ed è rappresentato con un intero senza segno a 32 bit; il secondo campo invece contiene l'informazione vera e propria portata dal TEDS ed è suddiviso a sua volta in campi contenenti le informazioni: per ogni campo viene specificato il tipo di dato memorizzato e la lunghezza del successivo campo contenente l'informazione vera e propria.

Infine il terzo campo contiene un *checksum* di dimensione fissa che consente di verificare l'integrità del TEDS.

TEDS principali

Riportiamo di seguito le tipologie di dati contenute nei principali TEDS^[6]:

Meta-TEDS

I meta-TEDS memorizzano i dati comuni a tutti i trasduttori connessi al TIM e fornisce le informazioni necessarie per accedere ad ogni canale di trasduzione. Contiene inoltre una descrizione generica della struttura dati dello stesso TEDS nonché dei parametri temporali al caso peggiore, utili al NCAP per definire correttamente i tempi di time-out e determinare quindi quando il TIM non risponde.

Solitamente è una memoria di sola lettura.

TransducerChannel-TEDS

Il TransducerChannel-TEDS memorizza informazioni dettagliate relative ad uno specifico canale di trasduzione.

Fornisce dati relativi ai parametri fisici misurati o controllati, i valori di offset entro i quali il dispositivo è in grado di operare, parametri dell'interfaccia di I/O digitale, modalità di funzionamento e temporizzazioni proprie del canale di trasduzione.

User's transducer name TEDS

Quest'area di memoria è riservata all'assegnazione di un nome identificativo del canale di trasduzione scelto dall'utente che viene utilizzato nell'identificazione del dispositivo.

Phy-TEDS

Questo TEDS non viene specificato dallo standard 1451.0 bensì dagli altri componenti della famiglia in quanto dipende dal mezzo di comunicazione utilizzato nella rete.

TEDS opzionali

Sono numerosi e permettono al costruttore di personalizzare il proprio dispositivo offrendo servizi aggiuntivi all'utente.

Tra i più importanti abbiamo:

- Calibration TEDS: fornisce i parametri di calibrazione necessari per ottenere una conversione fedele della quantità misurata;
- Text-based TEDS: specifica informazioni in formato testuale relative al TIM o al canale di trasduzione;
- Frequency response TEDS: fornisce la risposta in frequenza di un dato trasduttore;
- Transfer function TEDS: descrive la funzione di trasferimento di un dato trasduttore;

- End User Application Specific TEDS: memoria riservata all'utente per memorizzare informazioni in un qualsiasi formato;

2.2 Famiglia degli standard IEEE 1451

A causa della grande varietà delle tecnologie esistenti e di aspetti da dover trattare per poter definire uno standard solido per ogni possibile applicazione, sono stati creati vari gruppi di lavoro con lo scopo di lavorare parallelamente su più elementi da definire nello standard complessivo.

E' nata così la famiglia degli standard IEEE 1451, composta al suo interno da vari elementi che focalizzano l'attenzione su aspetti differenti della materia che vanno dalla definizione di funzioni e comandi di base comuni a tutti gli elementi dello standard, alla definizione dei TEDS, alle specifiche riguardanti l'impiego dei differenti standard di comunicazione IEEE (WiFi, Bluetooth, ZigBee, 6LoWPAN ecc.), siano esse cablate o wireless, per dispositivi analogici o digitali, per connessioni punto-punto o multidrop ecc.

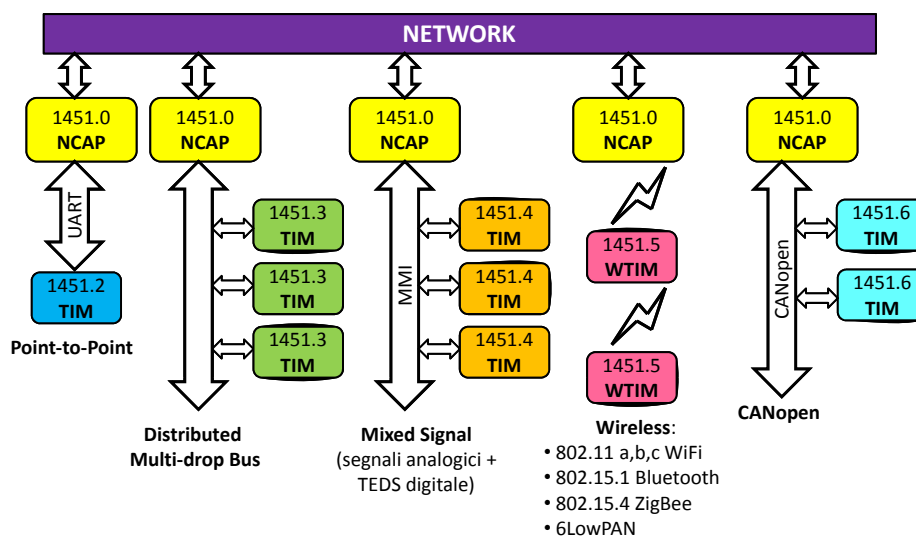


Figura 2.7: confronto tra i vari elementi della famiglia degli standard 1451

Diamo di seguito una breve descrizione di ogni elemento della famiglia, evidenziando la relativa area di competenza^[7].

2.2.1 IEEE 1451.0

Lo standard IEEE 1451.0 definisce un insieme di comandi e funzioni comuni a tutta la famiglia 1451, nonché la fondamentale standardizzazione dei TEDS. Le funzioni descritte dallo standard sono indipendenti dal mezzo fisico di comunicazione presente tra il trasduttore e il NCAP. Esse definiscono le modalità di accesso in lettura e scrittura al trasduttore nella configurazione, nella scrittura e lettura del TEDS e nell'invio dei comandi al TIM.

Esso si colloca dunque tra l'applicazione e il protocollo di comunicazione, come si può notare in figura, fungendo da *convergence layer*, ovvero un'interfaccia tra il *transport layer* e il layer superiore, assumendo il compito di tradurre i comandi provenienti dal livello superiore in comandi comprensibili al livello inferiore e viceversa.

Le funzionalità comuni di maggior rilievo specificate dallo standard sono:

- Definizione di canale di trasduzione e sua suddivisione in sensore, sensore ad eventi ed attuatore;
- Definizione della struttura dati (data set) utilizzata per memorizzare e trasmettere i dati acquisiti da un nodo sensore oppure i dati da fornire in ingresso ad un nodo attuatore;
- Definizione delle modalità di campionamento con le quali acquisire i dati dal sensore o fornire i dati ad un attuatore;
- Definizione delle modalità di trasmissione dei data set;
- Definizione dei meccanismi di trigger necessari per sincronizzare i nodi della rete;
- Definizione della struttura e dei contenuti dei TEDS;

Esso costituisce perciò il fondamento di tutta la struttura dello standard, permettendo perciò l'utilizzo congiunto dei restanti elementi della famiglia degli standard secondo le esigenze di utilizzo.

2.2.2 IEEE 1451.1

Questo elemento della famiglia definisce un modello comune e le specifiche riguardanti l'interfaccia per i dispositivi facenti parte di una rete di sensori intelligenti.

La sua architettura software si divide in tre modelli:

- Il primo modello di dati specifica la tipologia e la forma dell'informazione trasmessa sia in locale sia in remoto tra oggetti definiti dallo standard 1451.1.
- Un secondo modello definisce la tipologia dei componenti software utilizzate per progettare e implementare le applicazioni del sistema. Questo modello fornisce perciò dei mattoni con cui definire le applicazioni del sistema.
- Infine due modelli di comunicazione specificano sintassi e semantica delle interfacce software presenti tra gli oggetti dell'applicazione e il resto della rete.

L'insieme di questi modelli permette perciò la comunicazione tra le unità di calcolo (NCAP) verso gli altri nodi della rete (TIM) e verso altre unità di calcolo.

2.2.3 IEEE 1451.2

Lo scopo dello standard IEEE 1451.2 è quello di definire un'interfaccia trasduttore-NCAP oltre che il formato dei data sheet elettronici nel caso di configurazioni di connessione *point-to-point*.

Lo standard descrive un communication layer basato sull'utilizzo dell'interfaccia SPI (un sistema di comunicazione tra un microcontrollore e altri circuiti integrati o tra più microcontrollori) ampliato di alcune linee hardware per il controllo del flusso e la temporizzazione.

2.2.4 IEEE 1451.3

Similmente allo standard 1451.2, questo standard definisce un'interfaccia trasduttore-NCAP e data sheet elettronici nel caso in cui vi siano più trasduttori, che vengono configurati come nodi che condividono usando una stessa linea di comunicazione, cioè in presenza di comunicazioni *multi-drop*.

2.2.5 IEEE 1451.4

Lo standard 1451.4 definisce un'interfaccia in modalità mista per rendere compatibili con il sistema trasduttori analogici che operino sia in modalità digitale sia analogica. Un data sheet elettronico è quindi aggiunto al classico sensore analogico con la possibilità aggiuntiva di memorizzare un minimo di informazione utile al dispositivo. Ulteriori TEDS sono definiti per particolari tipi di sensori come microfoni o accelerometri.

2.2.6 IEEE 1451.5

L'obiettivo di questo standard è la definizione di un'interfaccia trasduttore-NCAP e data sheet per trasduttori wireless. Sono supportati vari standard di comunicazione, tra i quali figurano lo standard 802.11 (WiFi), 802.15.1 (Bluetooth), 802.15.4 (ZigBee) e 6LoWPAN.

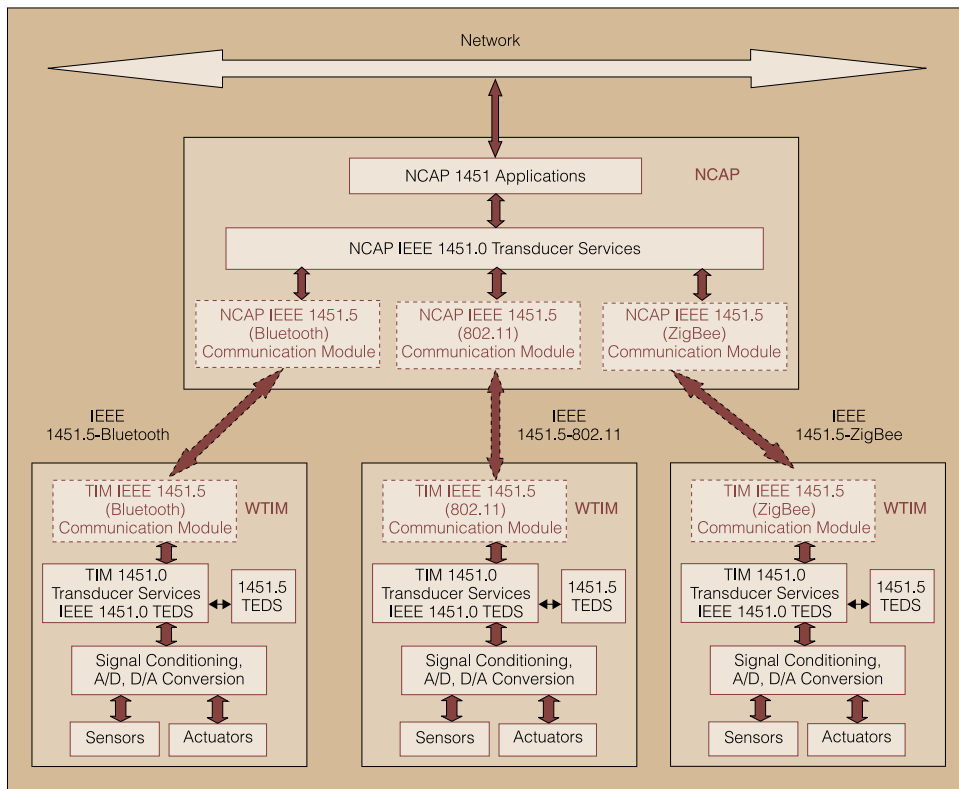


Figura 2.8: architettura dello standard 1451.5

In figura 2.8 è mostrato l'architettura dello standard. Il NCAP è un dispositivo capace di comunicare contemporaneamente con trasduttori wireless (WTIM) aventi ognuno un diverso protocollo di comunicazione, ed eventualmente essere connesso ad una rete esterna. Ogni WTIM sarà dunque formato da un dispositivo radio, un'unità di manipolazione del segnale, un convertitore A/D e infine un trasduttore.

2.2.7 IEEE p1451.6 (proposto)

Questo standard definisce l'interfaccia trasduttore-NCAP e data sheet supportando il protocollo di comunicazione CANopen.

2.2.8 IEEE p1451.7 (proposto)

Questo standard definisce un'interfaccia e un protocollo di comunicazione fra trasduttori e sistemi RFID (Radio Frequency Identification).

2.3 Vantaggi dello standard IEEE 1451

Grazie all'utilizzo del data sheet previsto dallo standard, è possibile estrapolare direttamente dal trasduttore informazioni quali nome del produttore, tipo del sensore, numero seriale, dati di calibrazione e altri formati standardizzati per il TEDS. I principali benefici dovuti a queste informazioni sono:

- Auto identificazione del sensore o attuatore: il trasduttore in possesso del TEDS può identificarsi e descriversi verso l'host esterno o la rete inviando le informazioni presenti nel TEDS.
- Il trasduttore può fornire un'auto documentazione a lungo termine: infatti il TEDS può essere aggiornato e memorizzare informazioni come la posizione del sensore, i dati di calibrazione, i record delle riparazioni effettuate e in generali dati relativi alla sua manutenzione.
- Riduzione dell'errore umano: il trasferimento automatico dei dati dal TEDS verso il sistema o la rete evita l'inserimento automatico dei dati che potrebbe generare errori.
- Semplificazione dell'installazione, dell'aggiornamento e della manutenzione dei sensori: i costi di gestione nell'intero ciclo di vita del sensore sono ridotti poiché chiunque può gestire queste operazioni in quanto altamente trasparenti all'utente.
- Possibilità di installazione in modalità *plug-and-play*: un TIM e un NCAP basati sullo standard IEEE 1451 possono essere connessi utilizzando un qualsiasi standard di comunicazione fisico senza alcun cambiamento del software del sistema. Non vi è bisogno di *drivers*

aggiuntivi o cambiamenti del software per poter utilizzare le operazioni di base dei dispositivi.

- Possibilità per un produttore di sensori di implementare un modulo TIM nei propri dispositivi senza dover diventare un fornitore di servizi di rete. Similmente un produttore di reti per sensori non deve necessariamente diventare un produttore anche di sensori.

Conclusioni

Attraverso l'analisi delle caratteristiche principali delle reti di sensori siamo stati in grado di estrapolare i punti di forza di questa tecnologia e al contempo gli aspetti critici che ne richiedono un ulteriore sviluppo.

Consci delle necessità che questi sistemi richiedevano, abbiamo potuto analizzare in che modo l'adozione di uno standard che uniformasse l'architettura sia fisica sia applicativa, permetta una semplice creazione di una rete di trasduttori intelligenti adatta ad una svariata serie di applicazioni.

Naturalmente non siamo ancora in grado di affermare di aver raggiunto il massimo grado di prestazioni ottenibili da questa tecnologia, dal momento in cui sono ancora tanti gli aspetti da ottimizzare e che sono tuttora in fase di studio.

Primo fra tutti, a livello di ricerca, vi è il Data Link Layer, dal momento che nonostante tecnologie come Bluetooth, WiFi, e ZigBee siano le più diffuse tecnologie per la connessione di WSN, la necessità di avere dispositivi sempre più semplici e sempre più economici richiede una ricerca che punti a coniugare tecniche avanzate di trasmissione e semplicità realizzativa.

Si ha la necessità inoltre di creare un'organizzazione efficiente della topologia della rete, per questo motivo si stanno iniziando ad adottare modalità di ricerca che considerino equamente protocolli MAC e di routing con il fine di ottimizzare le prestazioni della rete mantenendo bassa la complessità.

Ecco perché la possibilità in futuro di trarre vantaggio da queste tecnologie in campi critici come la salute, la sicurezza o l'energia passerà certamente dal successo di queste ricerche.

Bibliografia

[1] R. Verdone, D. Dardari, G. Mazzini, A. Conti, *Wireless Sensor and Actuator Networks – Technologies, Analysis and Design*, 2008, Academic Press

[2] Eugene Y. Song, Kang Lee, *Understanding IEEE 1451 – Networked Smart Transducer Interface Standard*, 2008, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine

[3] Torben R. Licht, *The IEEE 1451.4 Proposed Standard and Emerging Compatible Smart Transducers and Systems*

[4] <http://www.nist.gov/el/isd/ieee/ncap.cfm>

[5] Prof. Giada Giorgi, Reti di sensori e standard IEEE 1451, 2009

[6] <http://www.nist.gov/el/isd/ieee/teds.cfm>

[7] <http://www.nist.gov/el/isd/ieee/1451family.cfm>

[8] M. Kuorilehto, M. Kohvakka, J. Suhonen, P. Hamalainen, M. Hannaikainen, T. Hamalainen, *Ultra-Low Energy Wireless Sensor Network in Practice*, 2007, Wiley

[9] H. G. Ramos, *IEEE Standard 1451 and a Proposed Time Synchronization Approach*, 2008, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine

[10] Kang Lee, IEEE 1451: a Standard in support of Smart Transducer Networking, 2000, IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference

[11] *IEEE Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators— Wireless Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats*, 2007, IEEE-SA Standards Board