

# I sensori nel controllo di processo

**Il progresso della tecnologia dei sensori e delle modalità di comunicazione nel controllo di processo ha determinato una concomitante evoluzione nelle metodologie di controllo**

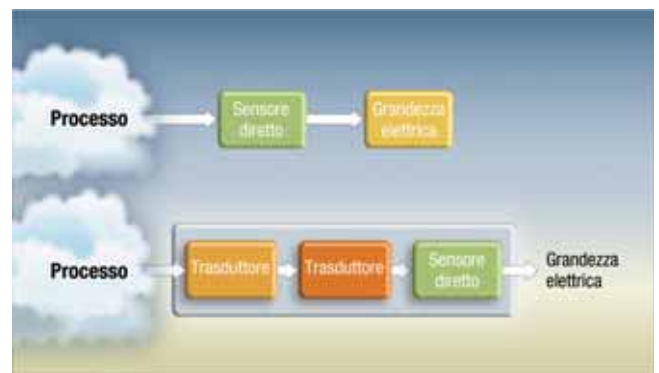
In quanto mezzi attraverso i quali il sistema di controllo percepisce la realtà fisica da manipolare, i sensori giocano un ruolo di primaria importanza nella moderna tecnologia dell'automazione. La qualità del controllo di processo è infatti in primo luogo limitata da quella degli strumenti di misura e dei sensori impiegati nel rilevamento dei parametri fisici che caratterizzano il processo.

Sistemi di misura e sensori differiscono per il fatto che i primi restituiscono il valore della grandezza fisica d'interesse, mentre i secondi, anziché un'indicazione diretta di tale valore, producono un segnale (tipicamente, ma non necessariamente, elettrico) destinato agli altri elementi del sistema di controllo. Che siano convertite in un segnale elettrico o pneumatico, nello spostamento meccanico di una lancetta o direttamente nella lettura su un display digitale, le misure effettuate da un sensore o da uno strumento devono condividere le proprietà di consistenza, ripetibilità e accuratezza. Sostituiscono e migliorano infatti le valutazioni che guidano l'operatore nel dosare gli ingredienti, i tempi e le modalità esecutive del processo di lavorazione. La disponibilità di sensori in grado di misurare praticamente ogni parametro fisico d'interesse, dalla temperatura alla pressione, dallo spostamento alla velocità, dal flusso alla forza, dalla concentrazione al pH, ha di fatto reso possibile la completa automazione del controllo. Nel corso degli anni i sensori per il controllo di processo sono stati soggetti a una considerevole evoluzione: da un lato nelle modalità di comunicazione con il resto degli elementi dell'automazione, dall'altro nella crescente capacità di elaborazione resa possibile dalla moderna tecnologia microelettronica. Hanno così trovato applicazione metodologie di connessione orientate al contenimento dei costi di cablaggio e manutenzione, ma anche nuovi paradigmi di controllo basati sulla distribuzione dell'intelligenza.

## Sensori diretti e complessi

Nella sua forma più semplice, un sensore è un dispositivo che si interfaccia con il processo oggetto della misura e fa corrispondere al valore o alle variazioni di una particolare grandezza fisica (meccanica, termodinamica, ottica, elettrica, magnetica...) quelle di un'altra grandezza di più facile gestione o lettura, tipicamente un segnale elettrico. Nei sensori diretti, la conversione

dell'energia associata alla grandezza da misurare in quella associata alla grandezza osservabile avviene in un unico stadio; un esempio in questo senso è rappresentato dai fotodiodi, che operano una conversione diretta dell'energia dei fotoni che incidono sulla giunzione P-N, nell'energia elettrica associata alle cariche liberate nell'interazione radiazione-materia. In generale, non è detto che esista o sia conveniente realizzare un sensore diretto per ogni grandezza del processo che deve essere misurata; si ricorre infatti spesso a sensori composti da più stadi di conversione, o di trasduzione, in cascata. Per esempio, la posizione lineare di una cremagliera può essere convertita nella posizione angolare di un potenziometro rotativo, quindi in un valore di resistenza che determina ai suoi capi una tensione, uscita del sensore percepita dallo stadio successivo. I sensori complessi possono essere visti come composizione di uno o più trasduttori (tipicamente non elettrici) e di un sensore diretto, che produce il segnale (tipicamente elettrico) rappresentante la misura.



**Anche nella sua forma più elementare, un sensore può essere costituito da più stadi, il cui scopo è convertire da una forma all'altra l'energia associata all'evento oggetto di misura**

Anche al netto degli effetti di carico, non tutti i sensori si interfacciano passivamente con l'ambiente di misura: è talvolta necessaria un'interazione diretta, costituita dalla generazione di stimoli, dalle cui risposte si può risalire al valore della grandezza da misurare. Per esempio, un sensore di livello a ultra-

suoni emette impulsi acustici ad alta frequenza per dedurre, dal tempo necessario alla loro riflessione da parte della superficie monitorata, la distanza del blocco emettitore-ricevitore. L'elaborazione numerica dei segnali amplia le possibilità di misura, permettendo la deduzione (per mezzo di algoritmi, formule o tabelle) del valore della grandezza d'interesse, partendo dalle misure di una o più grandezze a essa correlata, anche quando non esista un effetto fisico che le lega direttamente.

## Evoluzione verso lo stato solido

Il progredire della tecnologia micro e nano-elettronica ha portato a una crescente sofisticazione dei sensori: da un lato sono diventati sempre più numerosi i trasduttori allo stato solido, che utilizzano gli effetti fisici nel silicio o in altri materiali semiconduttori per misurare forza, accelerazione, temperatura, flusso luminoso, intensità del campo magnetico, temperatura e numerose altre grandezze; dall'altro è diventato sempre più facile incorporare direttamente nel sensore veri e propri elaboratori che implementano algoritmi complessi, in grado di determinare il valore della grandezza da misurare in base ai valori delle grandezze correlate che vengono effettivamente misurate. Non è infrequente vedere integrato nel corpo del sensore anche l'elettronica deputata al condizionamento del segnale, o persino alla sua codifica per la trasmissione su un canale condiviso dagli altri elementi del sistema di controllo. Il confine tra sensore, inteso come elemento sensibile, sistema di condizionamento e sistema di elaborazione si è fatto sempre più sfumato, fino a perdersi del tutto nel caso dei sensori intelligenti utilizzati nel controllo distribuito. Il trend verso i sensori allo stato solido e i Mems (Micro electro-mechanical system) è giustificato, oltre che dalla semplicità d'integrazione con l'elettronica ausiliaria, dalle vantaggiose economie di scala offerte da queste tecnologie produttive e dalla superiore robustezza dei dispositivi. Robustezza che rientra nel corredo d'ordinanza di ogni componente industriale impiegato nel controllo di processo. Rispetto ai sensori utilizzati in altri ambiti, meno esigenti sul fronte della resistenza alle sollecitazioni esterne, i dispositivi industriali si trovano infatti spesso a operare in condizioni ambientali caratterizzate da alti livelli di vibrazione e interferenze elettromagnetiche, oltre che in condizioni di temperatura e umidità estreme. Il ricorso a connettori industriali e a contenitori protettivi, impermeabili all'umidità, alla polvere e in taluni casi agli agenti corrosivi, fornisce una prima protezione a questi componenti.

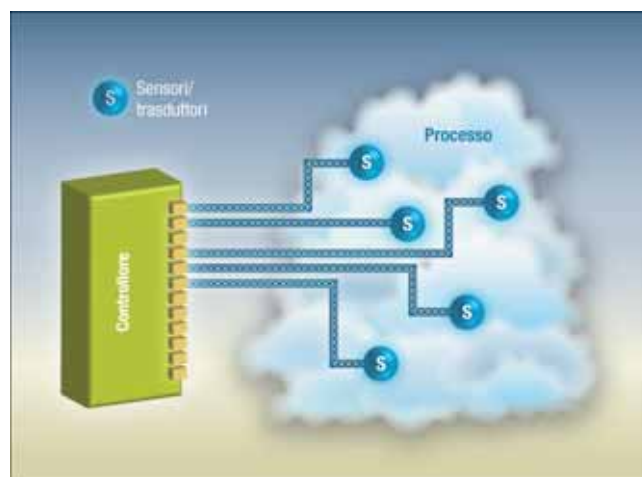
Ancora più importante è poi la selezione operata in origine: prima di poter essere immessi sul mercato i sensori industriali devono passare una serie di test che ne certifichino l'intervallo di funzionamento, la resistenza agli urti e alle vibrazioni e la durata minima.

## Dall'analogico...

Per quanto importanti, i sensori sono solo uno degli elementi di un sistema di controllo, il cui funzionamento dipende da tutta una serie di altri componenti che vanno dagli attuatori alla logica di controllo (sempre più spesso realizzata con microprocessori), passando per circuiti di alimentazione e con-

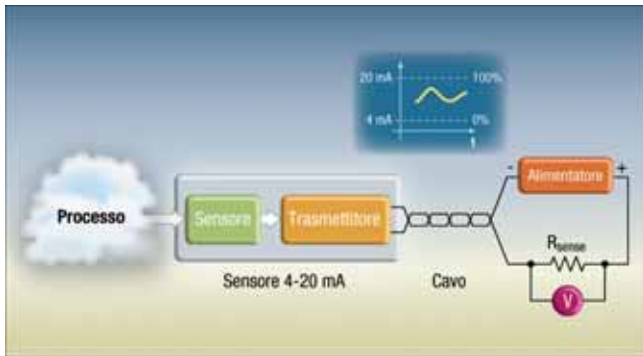
dizionamento. Le informazioni raccolte dai sensori vengono impiegate dalla logica di controllo per elaborare le strategie ottimali di comando degli attuatori. In tutto questo assumono un ruolo di rilievo il tipo di collegamento e le modalità di comunicazione tra le varie parti. Le tecniche e le strategie di controllo sono limitate o rese possibili dalla particolare tecnologia che permette ai diversi nodi della rete di scambiarsi informazioni. I sistemi di controllo nascono e si sviluppano nel 'regno' analogico: i risultati delle misure effettuate dai sensori sono codificati nell'andamento temporale di una grandezza elettrica (una tensione o una corrente), che viene trasmessa a un controllore centrale per mezzo di un collegamento dedicato punto-punto. L'immediatezza con cui l'informazione viene resa disponibile alla logica di controllo (non servono conversioni in formato numerico, serializzazione, conquista dell'accesso di un canale condiviso di comunicazione e successiva decodifica) è controbilanciata dalla complessità e dai costi di cablaggio e manutenzione.

Dato che l'unica informazione a essere comunicata è il valore analogico della variabile di processo o del segnale necessario a pilotare un attuatore, diagnostica, calibrazione e manutenzione devono essere effettuate direttamente sui singoli sensori, là dove sono installati.



## Il collegamento dei sensori analogici all'unità di controllo, sia essa centralizzata o locale, avviene per mezzo di collegamenti separati di tipo punto-punto

I sensori analogici, tuttavia, non sono una rarità in ambito industriale: sono ancora moltissimi gli impianti che fanno ricorso a comunicazioni analogiche per mezzo di un anello di corrente 4-20 mA. Nella modalità di collegamento più semplice, a due fili, il sensore che si appoggia a questo standard viene collegato in serie a un alimentatore (per esempio da 24 V) e a una resistenza di sense e fa sì che nell'anello così formato scorra una corrente compresa tra 4 e 20 mA, in misura direttamente proporzionale al valore della grandezza misurata. A 4 mA corrisponde lo 0% della grandezza oggetto della misura, a 20 mA, invece, il 100%. Anche quando deve comunicare un valore nullo della grandezza da misurare, il circuito che gestisce la conversione e genera il segnale di corrente può contare sui 4 mA, che non rappresentano il segnale per la sua alimentazione.



**Nello standard analogico 4-20 mA i valori della variabile di processo misurata dal sensore sono comunicati per mezzo di valori di correnti compresi tra 4 e 20 mA**

La scelta di trasmettere un segnale in corrente, invece che in tensione, è dovuta al fatto che il valore della corrente è necessariamente lo stesso in ogni punto dell'anello, a prescindere dalla sua estensione. Con un segnale in tensione, sulle lunghe tratte, le perdite dovute alla resistenza non nulla dei conduttori di collegamento porterebbero a un affievolimento del segnale con il crescere della distanza sensore-controllore. L'offset di 4 mA, il cosiddetto 'live zero' per gli anglofoni, permette di identificare la condizione di guasto più tipica: quella di un cavo interrotto, che determina l'apertura del circuito. Inoltre, se viene fatta scorrere attraverso una resistenza di sense da 250 Ohm, la corrente compresa tra 4 e 20 mA sviluppa una tensione nell'intervallo di valori 1-5 V, che può essere facilmente gestita dalla logica di controllo.

Quando le distanze da coprire sono limitate si possono usare senza eccessivi problemi anche sensori che forniscono un'uscita in tensione. Spesso l'uscita è proporzionale al valore da misurare ed è compresa tra due valori convenzionali prefissati (per esempio tra 0 e 5 V, oppure tra 1 V e 6 V), oppure è una frazione predefinita della tensione di alimentazione del ponte di misura (nel qual caso l'uscita è indicata in termini di mV di segnale per V di alimentazione, o mV/V).

In generale, il sensore può esibire una variazione arbitraria e non necessariamente lineare di tensione o di corrente, oppure di altri parametri elettrici, come la resistenza ai suoi capi, o la sua capacità. In questi casi, è compito del sistema di condizionamento convertire queste grandezze in segnale intelligibile al sistema di controllo.

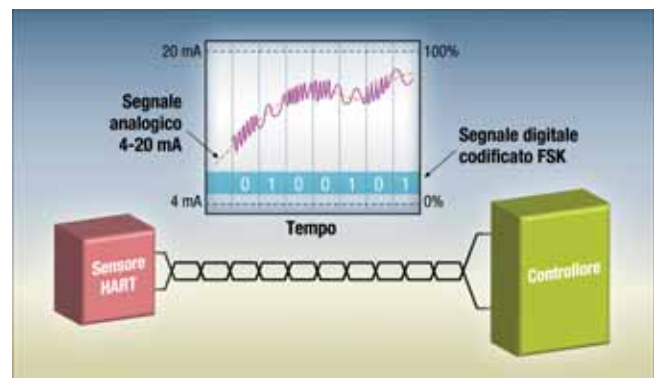
### ...al digitale

Per quanto immuni ai problemi di attenuazione del segnale sulle lunghe tratte, gli anelli di corrente analogici sono soggetti a interferenze elettromagnetiche, specialmente quando i fili che vanno ai sensori corrono vicini ai cavi che portano potenza nei diversi punti dell'impianto da controllare. Non solo, l'accuratezza dei valori rilevati dal controllore sono limitati, oltre che da limiti intrinseci del sensore e dal rumore intercettato lungo il tragitto, dalla deriva termica e dalla tolleranza, talvolta grossolana, della resistenza di sense.

A fronte di una maggiore complessità dell'elettronica richiesta, il passaggio alle comunicazioni numeriche offre un'elegante

soluzione a questi problemi. La maggiore flessibilità offerta dalla tecnologia digitale permette di utilizzare lo stesso mezzo trasmissivo per trasmettere tutta una serie di informazioni accessorie, che vanno ben al di là del semplice valore della grandezza da misurare. I dati di calibrazione e configurazione del sensore, le informazioni diagnostiche e di manutenzione preventiva, eventuali allarmi, l'aggiornamento dei driver software e la trasmissione di altre misure secondarie possono avere luogo sullo stesso mezzo condiviso da centinaia di sensori e attuatori, con una drastica semplificazione delle operazioni di gestione e manutenzione del sistema di controllo.

Tralasciando le interfacce digitali parallele, i cui costosi e ingombranti cavi multifilari hanno una loro ragion d'essere nel collegamento della strumentazione elettronica sui banchi di misura (come nel caso di IEEE 488-GPIB), ma risultano improponibili nelle assai più estese applicazioni di automazione e controllo di processo, rimane aperta la strada delle comunicazioni seriali. Con il protocollo Hart (Highway addressable remote transducer) si è intrapresa la strada della continuità rispetto al passato analogico: anziché abbandonare le comunicazioni analogiche su anello di corrente 4-20 mA, si è scelto di aggiungere le informazioni complementari in formato digitale sullo stesso canale. Alla corrente che trasporta il messaggio analogico viene sovrapposto un segnale digitale codificato per mezzo di due frequenze distinte (modulazione FSK).



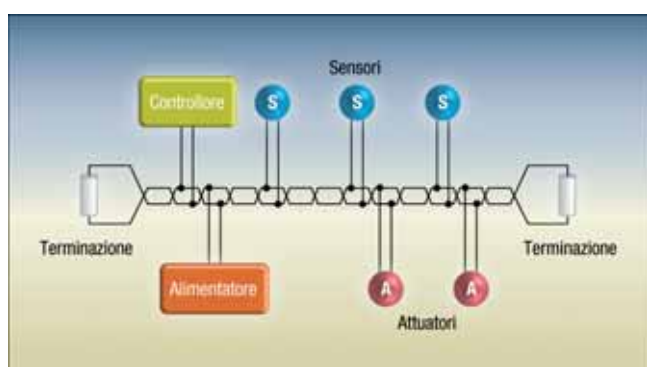
**Nel protocollo Hart un segnale digitale codificato con modulazione FSK viene sovrapposto al segnale analogico in corrente proporzionale alla misura effettuata**

I sensori intelligenti di questo tipo (così come gli attuatori e i controllori) sono dotati di un circuito che, da un lato provvede a codificare il messaggio numerico e a serializzarlo in base ai dettami del protocollo; dall'altro effettua l'operazione inversa, al fine di garantire le comunicazioni bidirezionali. Diventa così possibile aggiungere a un impianto tradizionale componenti 'intelligenti' senza stravolgere la topologia della rete di controllo, ottenendo i vantaggi della tecnologia digitale in termini di semplicità di configurazione e diagnostica.

Nel complesso, il protocollo Hart rappresenta una soluzione economica e robusta per molte applicazioni di controllo di processo e ha addirittura contribuito a incrementare la diffusione dei sensori 4-20 mA in ambito industriale. A motivare una diffusione sempre maggiore delle comunicazioni completamente

digitali è stata invece l'esigenza di una drastica semplificazione del cablaggio, primo responsabile della lievitazione dei costi d'installazione e manutenzione.

La tecnologia digitale permette di veicolare un'enorme quantità di informazioni su un mezzo condiviso, sia esso il cavo multifilare di un'interfaccia seriale RS232 o RS485, il doppino in rame o il cavo coassiale in una configurazione multidrop, o un collegamento via etere. La soluzione all-digital più usata è rappresentata dai bus di campo, bus seriali disponibili in versione proprietaria o aperta, che semplificano l'installazione e l'aggiornamento delle reti di sensori (e attuatori) afferenti al sistema di automazione e che hanno aperto la strada a nuove metodologie di controllo, più flessibili e più sofisticate.



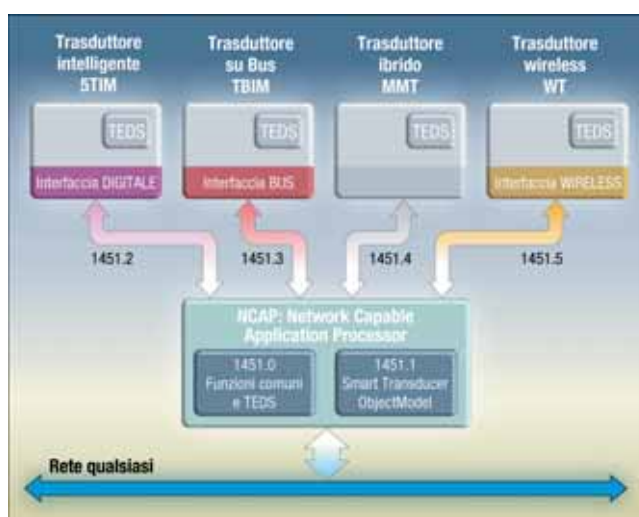
**Una delle tipologie di rete più diffuse nel controllo di processo è quella a bus di campo, che vede sensori e attuatori connessi tra loro in cascata lungo un bus seriale**

### Smart sensor: dal plug&play al controllo distribuito

Tra le semplificazioni consentite dall'elaborazione numerica figura l'introduzione dei cosiddetti sensori plug&play, dispositivi in grado di farsi riconoscere dal sistema di controllo e pensati per automatizzare le procedure d'installazione e calibrazione. La famiglia di standard IEEE 1451 (1451.1, .2, .3, .4 e .5) specifica interfacce e metodi condivisi per la connessione di sensori e attuatori a reti di controllo e bus di campo di varia natura. Lo standard 1451.1, per esempio, definisce un modello di trasduttore intelligente agnostico dal punto di vista dei protocolli e della rete cui è connesso. Le specifiche 1451.2 definiscono un modulo standard d'interfacciamento per trasduttori digitali (Stim - Standard transducer interface module), indicando le modalità di condizionamento, linearizzazione e conversione dei segnali, taratura e comunicazione. L'identificazione del sensore e dei suoi parametri d'uso passa attraverso il data-sheet in formato elettronico, o Teds (Transducer electronic data sheet), che viene utilizzato dal sistema di controllo per automatizzare le varie operazioni di calibrazione, misura e diagnostica.

I Teds sono generalmente memorizzati in una memoria non volatile, che fa parte del sensore; per i sensori analogici che non dispongono di un'elettronica di bordo in grado di ospitarli è previsto il ricorso ai Teds virtuali, file di dati che il sistema di controllo scarica dal database del produttore.

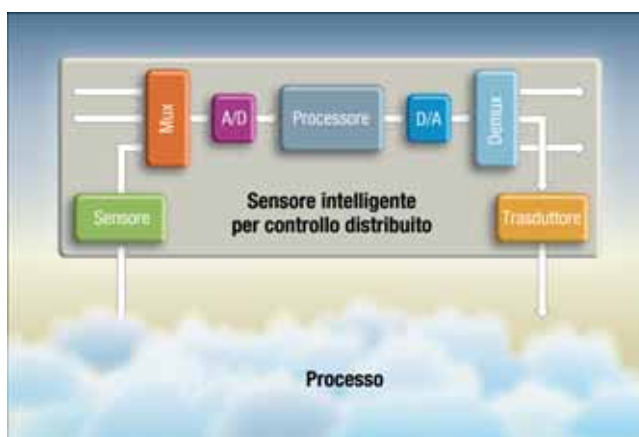
I sensori plug&play non esauriscono le possibilità messe a disposizione dalla tecnologia digitale. Con il progredire della



**Gli standard IEEE 1451 descrivono le specifiche per la realizzazione di sensori plug&play.**

**Nella loro forma più evoluta, i moderni sensori di processo incorporano tutta una serie di componenti (convertitori A/D e D/A, cpu, memorie con i dati di calibrazione) che permettono di elaborare le strategie di controllo distribuite sulla base delle informazioni raccolte localmente**

tecnologia microelettronica e l'abbattimento dei costi di microprocessori, chipset di comunicazione e memorie, si è andata delineando una nuova generazione di sensori intelligenti, in grado non solo di comunicare con il sistema di controllo, ma di farne addirittura le veci. I dispositivi più avanzati integrano al loro interno l'elettronica di condizionamento, un convertitore A/D, la logica di controllo, un convertitore D/A e i circuiti di ampli-



### Smart sensor: sensori evoluti

cazione necessari al pilotaggio degli attuatori. Si prestano alla realizzazione di sistemi di controllo distribuiti, che presentano il vantaggio di alleggerire il carico sul processore centrale, semplificare il cablaggio e garantire un più tempestivo intervento attraverso le operazioni locali. Le comunicazioni con il sistema di controllo centrale avvengono tipicamente per mezzo di un bus seriale, che veicola i valori delle variabili di processo, i dati diagnostici, di configurazione e di calibrazione.