

INTRODUZIONE AL CONTROLLO DIGITALE

Prima della rivoluzione digitale l'implementazione hardware degli elementi di controllo e dei trasduttori era basata sull'uso di componenti idraulici, pneumatici e di collegamenti meccanici.

In seguito queste tipologie di regolatori e trasduttori furono sostituite con unità elettroniche analogiche che impiegavano transistor e amplificatori operazionali. In particolare, le unità elettroniche e analogiche permisero lo sviluppo del controllo PID e di alcune tecniche di controllo non lineare.

Successivamente, l'avvento dei microprocessori ha rivoluzionato l'intera industria dei sistemi di misura e controllo. In effetti, è stata proprio la diffusione dei controllori digitali a permettere lo sviluppo di nuovi schemi di controllo sempre più sofisticati, adatti praticamente a qualsiasi tipo di sistema, anche con forti non linearità e ritardi puri.

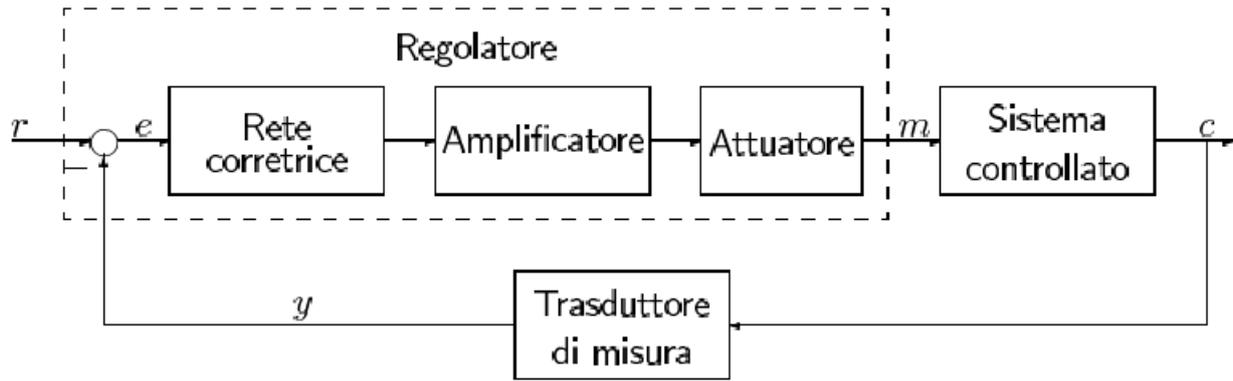
Nel seguito introduciamo brevemente i sistemi di controllo digitale, in cui un personal computer oppure un microprocessore/microcontrollore dedicato viene utilizzato in sostituzione di un controllore analogico.

Un controllore digitale ha la stessa funzione di un controllore analogico: controllare la risposta (in anello chiuso) del sistema. Un sistema di controllo digitale è dunque un sistema di controllo in retroazione in cui è presente un calcolatore digitale e quindi una elaborazione a tempo discreto della legge di controllo.

Evidentemente, poiché un calcolatore non può avere in ingresso un segnale analogico, non può essere interfacciato direttamente con trasduttori o potenziometri. Allo stesso modo, esso non può generare direttamente un segnale analogico reale come una pressione, una tensione o una corrente, quindi non può essere interfacciato direttamente con gli attuatori presenti nell'anello di regolazione, essendo questi generalmente dei sistemi analogici.

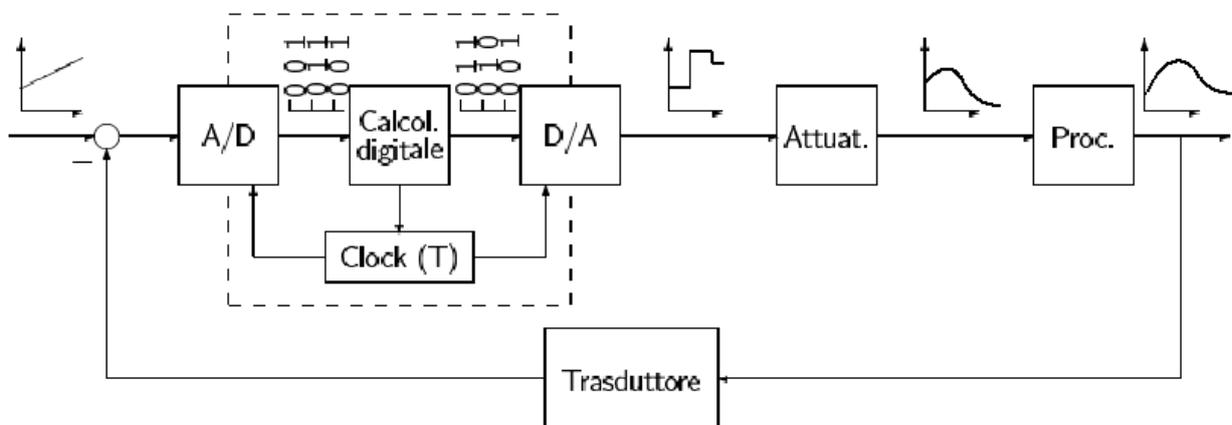
Nell'anello di controllo è necessario pertanto un convertitore analogico/digitale (A/D o ADC, Analog Digital Converter) che converte il segnale analogico in una sequenza di dati binari e un convertitore digitale/analogico (D/A o DAC, Digital Analog Converter) che converte la sequenza di controllo binaria in un segnale analogico e funge da interfaccia con gli elementi di controllo analogici a valle del calcolatore.

Nella figura seguente è rappresentato un tipico schema di controllo analogico.



Il regolatore è costituito da una rete correttiva (o da un regolatore standard) seguito da un amplificatore, che riporta il segnale di controllo nel range di ingresso del plant, e da un organo attuatore. Tali componenti del controllore sono tutti analogici, dunque non sono necessari dispositivi di conversione che fungano da interfacce con il plant e il sensore.

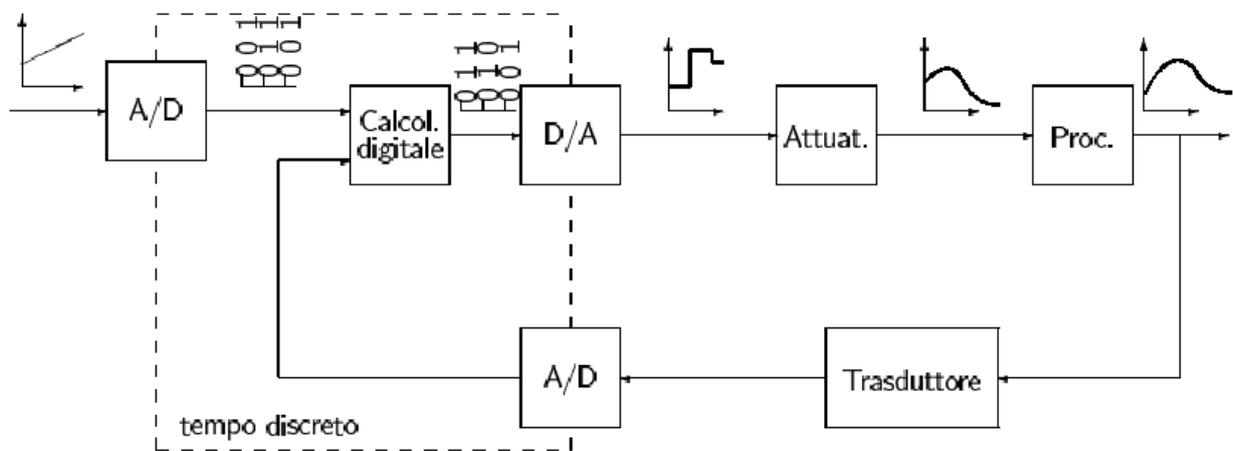
Consideriamo ora il tipico schema di controllo digitale, rappresentato nella figura seguente.



Come si vede nello schema a blocchi, il controllore analogico convenzionale è stato sostituito con un calcolatore che esegue un programma in cui è implementato l'algoritmo di controllo. Sono inoltre presenti un convertitore A/D e un convertitore D/A.

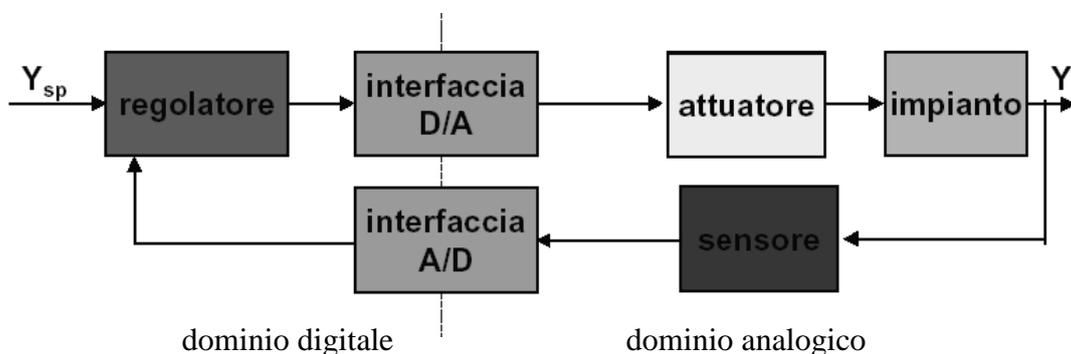
Il controllore digitale, quindi, accetta i valori dell'errore discretizzati dall'ADC e processa tali dati secondo il software che implementa l'algoritmo di controllo, generando quindi un'uscita appropriata tramite il DAC.

Uno schema alternativo è riportato nella figura seguente.



Quest'ultimo schema determina l'errore nell'ambito del programma che implementa la legge di controllo sull'elaboratore. In altri termini, mentre nel caso precedente è l'errore ad essere discretizzato, in questa configurazione del tutto equivalente sono il segnale di riferimento e quello retroazionato ad essere trasformati in grandezze digitali, e la generazione del segnale differenza (ossia dell'errore) avviene internamente al programma eseguito sul calcolatore digitale.

Si osserva anche che quest'ultimo schema richiede l'utilizzo di due ADC. Ovviamente è anche possibile definire il segnale di riferimento direttamente in digitale (ossia nell'ambito del programma di controllo che viene eseguito sull'elaboratore), in modo da utilizzare un unico ADC in uscita al trasduttore. Questo schema ancora equivalente ai precedenti è riportato nella figura successiva ed ha il vantaggio di richiedere un solo ADC come il primo schema.



I vantaggi dell'approccio digitale rispetto a quello analogico sono molteplici. Nei sistemi di controllo digitale si ha generalmente una maggiore capacità di elaborazione e quindi una precisione accresciuta. Inoltre la flessibilità della legge di controllo ottenuta in ambito digitale è maggiore, poiché cambiare il regolatore equivale a modificare poche righe di codice nel programma eseguito sull'elaboratore. Anche l'affidabilità del sistema di controllo e la ripetibilità degli esperimenti è maggiore.

Anche l'approccio di controllo digitale ha comunque alcuni svantaggi. Innanzitutto la progettazione è più complessa e articolata, la stabilizzabilità dei sistemi è più precaria e vi è la possibilità di arresti non previsti causati da malfunzionamenti del calcolatore. Inoltre tali sistemi di controllo presuppongono la possibilità di utilizzo di energia elettrica senza interruzioni.

In definitiva un anello di controllo digitale contiene una parte tempo-continua, che comprende il processo/impianto, i sensori e gli organi attuatori, e da una parte tempo discreta che comprende il sistema di controllo, connesse attraverso le interfacce A/D e D/A.

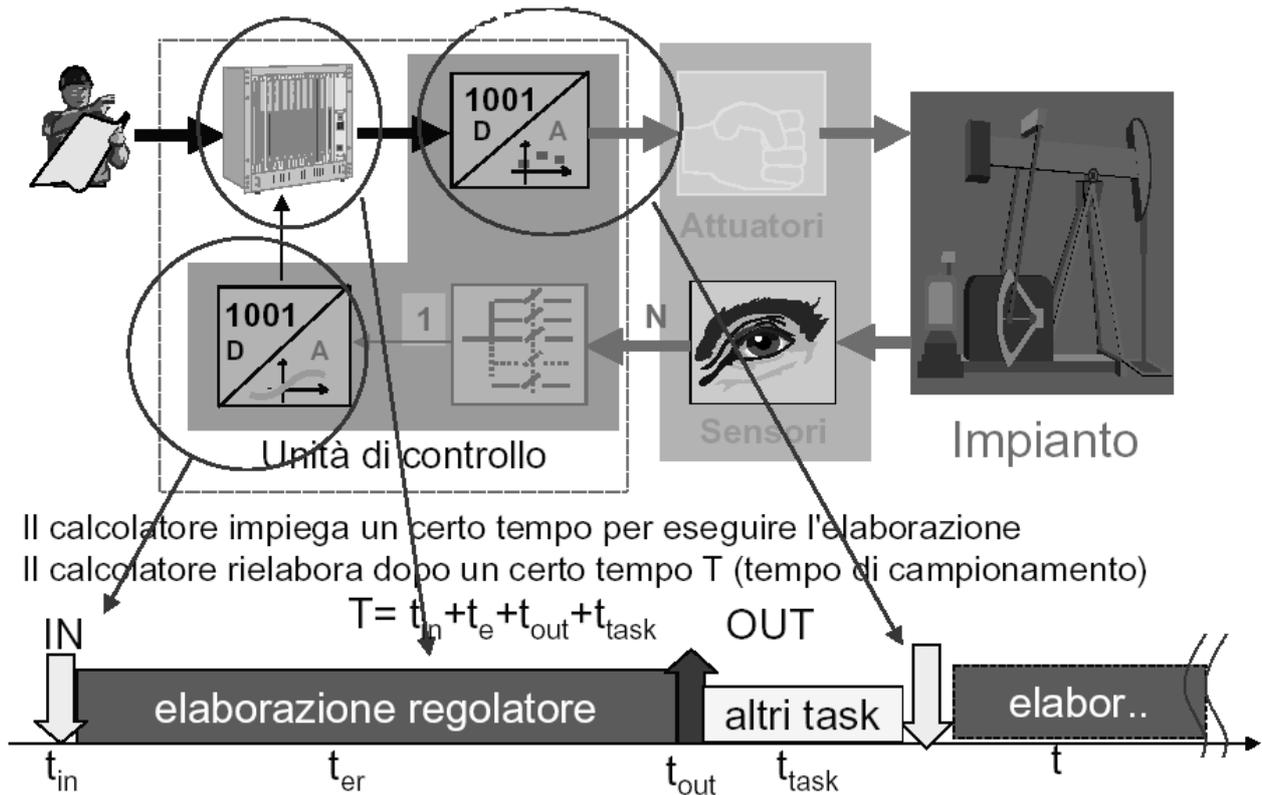
Il compito di tali interfacce è, oltre che convertire i segnali in modo che siano gestibili da entrambe le parti analogica e digitale dell'anello di controllo, anche quello di tenere conto dei tempi di elaborazione digitale.

Infatti un calcolatore digitale fornisce l'azione di controllo digitale in base all'ingresso digitale (ossia esegue il programma che implementa l'algoritmo di controllo) in un tempo finito.

L'intervallo di tempo T corrispondente al periodo di acquisizione/calcolo/attuazione è detto tempo di campionamento del regolatore digitale. Il tempo di campionamento T è dunque il tempo impiegato dall'elaboratore per eseguire tutte le operazioni di un ciclo (di acquisizione/calcolo/attuazione), o l'intervallo di tempo necessario per ripetere un'operazione.

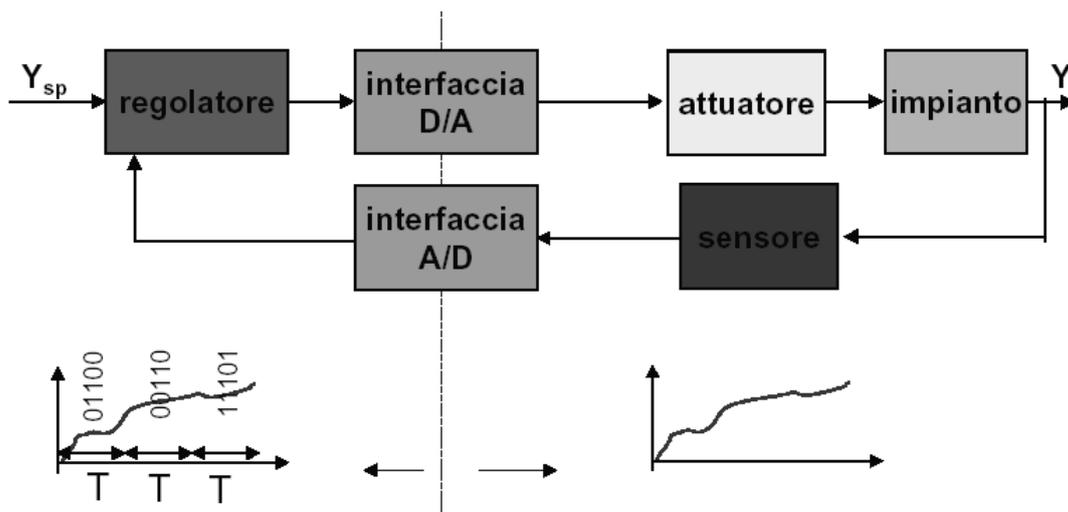
Il tempo di campionamento dipende dal processo e può variare da pochi microsecondi a diversi secondi.

Evidentemente, se il tempo di esecuzione dell'anello è molto piccolo rispetto alle costanti di tempo in gioco nel plant, non sono necessarie considerazioni sul tempo di campionamento, che può essere trascurato. Se invece esso è dello stesso ordine di grandezza delle costanti di tempo del sistema è importante studiare l'anello di controllo con tecniche ad hoc, dette appunto di controllo digitale.



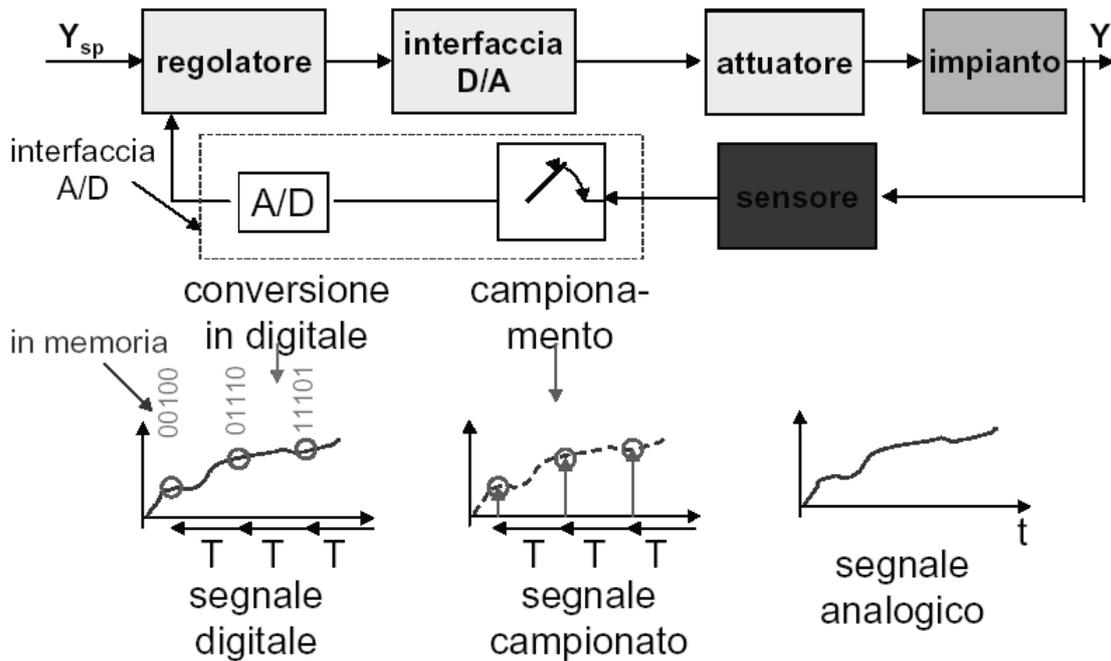
Ne consegue che la scelta del tempo di campionamento è fondamentale nella implementazione corretta di un sistema di controllo digitale.

Vediamo ora più in dettaglio le trasformazioni che avvengono sulle variabili all'interno dell'anello di retroazione, anche alla luce della presenza del tempo di campionamento T.



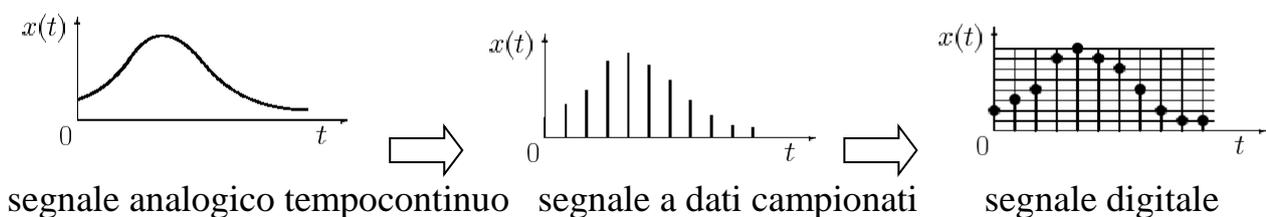
Come si vede dalla figura, è possibile effettuare una grossolana classificazione delle grandezze presenti in un anello di controllo digitale. In particolare, a valle dell'interfaccia digitale/analogica e prima di quella analogico/digitale si hanno segnali analogici a tempo continuo. Viceversa, nell'altra parte dell'anello le grandezze sono digitali.

In particolare, l'interfaccia A/D è tipicamente costituita come nella figura successiva.

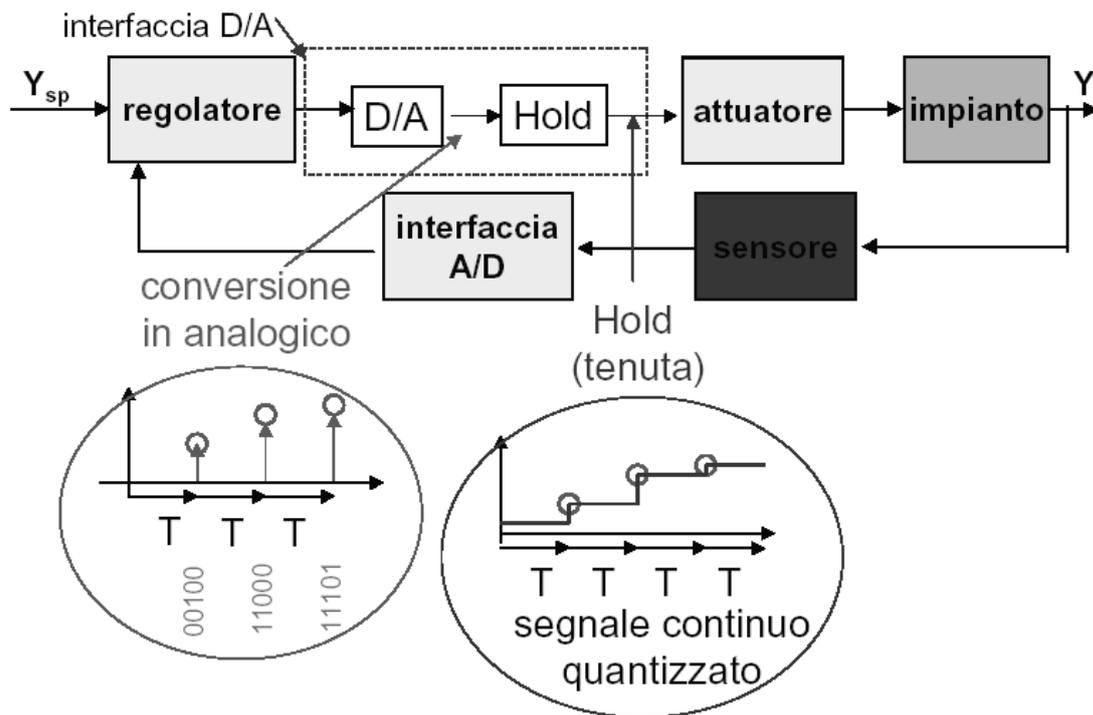


Il segnale misurato dal sensore è evidentemente *analogico e tempo continuo*. Esso viene quindi prima campionato ogni T intervalli di tempo da un dispositivo di campionamento ottenendo un segnale *a dati campionati* che viene quindi convertito in un segnale *digitale* dal dispositivo di conversione A/D.

Di seguito sono ancora schematizzate le conversioni che avvengono tra l'ingresso e l'uscita dell'interfaccia analogico/digitale.

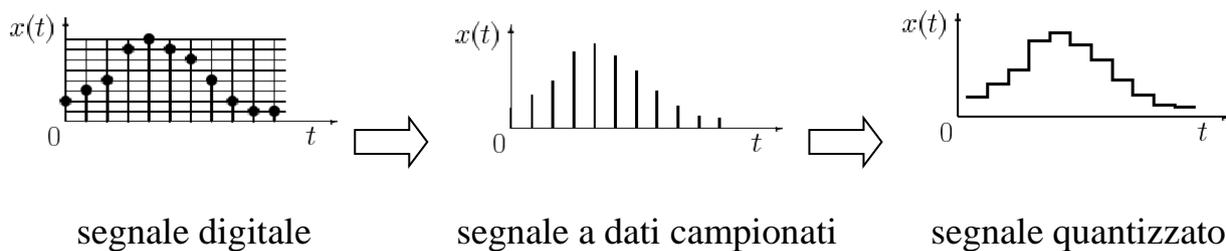


Vediamo ora in dettaglio l'interfaccia D/A, riportata nella figura successiva.



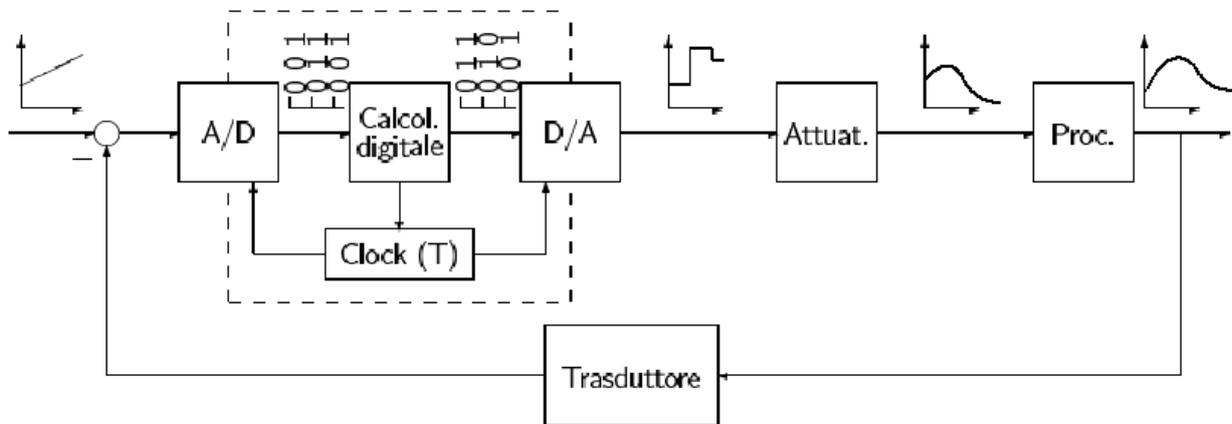
Il segnale fornito dall'elaboratore è *digitale*. Per essere reso utilizzabile dall'attuatore, esso viene quindi prima convertito in segnale *a dati campionati* dal DAC e quindi questo viene trasformato da un dispositivo di tenuta (Hold) in un segnale tempocontinuo quantizzato che è fornito all'attuatore.

Di seguito sono schematizzate le conversioni che avvengono tra l'ingresso e l'uscita dell'interfaccia digitale/analogica.



Il segnale quantizzato fornito dal dispositivo di tenuta viene quindi passato all'organo attuatore, che lo trasforma in un segnale analogico. Questo è il segnale di controllo analogico tempocontinuo che il plant riceve in ingresso.

Nella figura seguente è riproposto l'anello di controllo digitale con le diverse tipologie di segnali presenti.



In definitiva, le grandezze elaborate dal regolatore digitale sono l'immagine a tempo discreto di quelle elaborate dal regolatore analogico (a tempo continuo). Le grandezze attuate (ossia i segnali in ingresso all'attuatore) sono il risultato dell'elaborazione a tempo discreto e vengono mantenute costanti per tutto l'intervallo di campionamento successivo all'intervallo di campionamento in cui vengono determinate dal dispositivo di tenuta.

Esistono in particolare due diverse filosofie di progetto dei regolatori digitali.

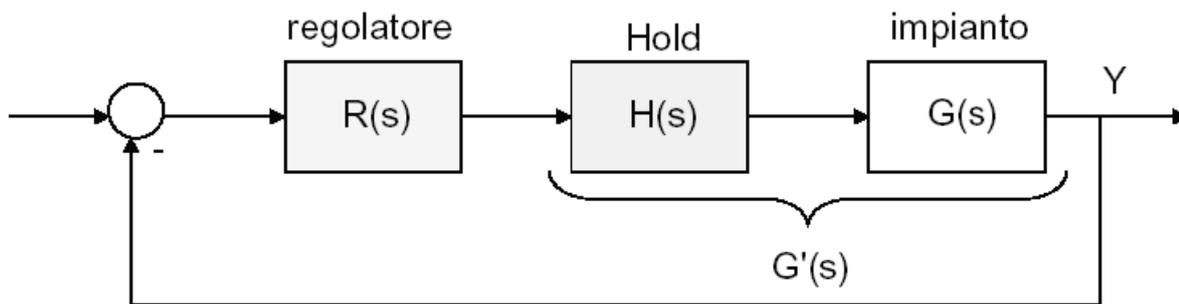
Sintesi diretta di un controllore digitale - Una prima opzione è il metodo diretto, che consiste nell'effettuare il progetto del regolatore direttamente nel dominio del tempo discreto (ossia con equazioni alle differenze o utilizzando la cosiddetta Z-trasformata). Rispetto al classico anello di retroazione analogico, il regolatore va quindi riprogettato in una forma idonea alla implementazione su calcolatore: in particolare, da modelli basati sulle equazioni differenziali si passa alle equazioni alle differenze. Analogamente, si utilizza lo strumento tipico per la progettazione di un sistema di controllo digitale, ossia la Z-trasformata, che è l'analogo discreto della nota L-trasformata o trasformata di Laplace. In altre parole, con questa tecnica si approssima la connessione serie mantentore-processo $G(s)$ -campionatore con una funzione di trasferimento nel dominio della z-trasformata $G_d(z)$ e si progetta direttamente in tempo-discreto un controllore $R(z)$ che soddisfa tutte le specifiche.

Discretizzazione di un controllore analogico - Un secondo metodo è quello indiretto, che prevede il progetto del sistema di controllo a tempo continuo, utilizzando le tecniche dei controlli automatici classici, e la successiva

discretizzazione del regolatore. In altre parole, in questo caso si progetta con tecniche classiche (ad esempio sintesi per tentativi) la funzione di trasferimento $R(s)$ di un controllore analogico che consente di soddisfare tutte le specifiche, successivamente si determina la funzione di trasferimento $R_d(z)$ di un controllore digitale che, collegato in serie fra i convertitori D/A e A/D, approssima il comportamento del controllore analogico progettato.

Quest'ultimo metodo è più semplice della sintesi diretta perché non richiede molte conoscenze aggiuntive rispetto a quelle viste per i sistemi analogici sino a questo punto. In particolare, occorre integrare il progetto analogico (ossia del regolatore continuo) con la previsione dell'effetto del dispositivo di hold (tenuta) presente in uscita al regolatore.

In definitiva, nel caso della discretizzazione l'anello di controllo sul quale si effettua la progettazione è il seguente:



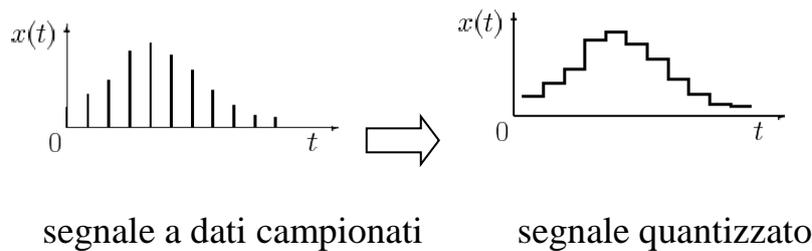
dove la funzione di trasferimento di anello è

$$G_A(s) = R(s)G'(s)$$

essendo $G'(s)$ la combinazione della funzione di trasferimento del plant e del dispositivo di tenuta

$$G'(s) = H(s)G(s).$$

Il dispositivo di tenuta può essere di varie tipologie. Il più semplice, il mantentore di ordine zero, trasforma un segnale a dati campionati in un segnale quantizzato, semplicemente mantenendo il valore dei campioni invariato per un intero periodo di campionamento.



Si può dimostrare che la funzione di trasferimento di un dispositivo di tenuta è approssimabile come segue:

$$H(s) \approx \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \approx e^{-\frac{T}{2}s}$$

dove T è il tempo di campionamento. Ne consegue che la discretizzazione di un regolatore analogico comporta problemi in termini di stabilità dovuti alla presenza del ritardo puro. Pertanto è necessario, dopo aver definito T , verificare i margini di stabilità del sistema.

Una volta progettato il regolatore analogico tenendo conto del dispositivo di tenuta, è possibile discretizzare il controllore utilizzando svariati metodi di discretizzazione, essenzialmente classificabili in metodi di approssimazione nel dominio del tempo e in metodi di approssimazione frequenziale.

Quindi, generalmente si effettua una verifica simulativa del controllore digitale realizzato, eventualmente anche confrontando regolatori discreti ottenuti con diverse tecniche di discretizzazione.

Infine il controllore viene sperimentato sull'impianto.

In ogni caso, nel processo descritto è fondamentale la scelta del tempo di campionamento (e quindi anche della potenza dell'elaboratore digitale sul quale implementare l'algoritmo di controllo), che influenza la stabilità del sistema e comunque deve essere il più piccolo possibile in modo da essere trascurabile rispetto alla minima costante di tempo del sistema.

Tale scelta è influenzata dai seguenti fattori: costo dei dispositivi A/D, D/A e potenza di calcolo richiesta; problemi numerici (perdita di precisione per T piccolo); sensibilità ai disturbi; campionamento e informazione: la pulsazione di campionamento va commensurata alla banda richiesta al sistema retroazionato.

In particolare, un risultato importante è il Teorema di Shannon, il quale stabilisce che, detti T il periodo di campionamento e B la banda passante desiderata, e detta $\omega_c = \frac{2\pi}{T}$ la pulsazione di campionamento o pulsazione di Nyquist, perché il segnale sia completamente ricostruibile dal segnale campionato occorre scegliere $\omega_c \geq 2B$, ovvero $T \leq \frac{\pi}{B}$. Una buona regola euristica consiste nello scegliere $\frac{\omega_c}{B} \in [6, 20]$.

Approfondimenti consigliati:

Capitolo 9 ed esercizi del testo G. Marro, Controlli Automatici, Zanichelli, 2004.