

Introduzione ai sistemi embedded

Sistemi Embedded
Anno accademico 2021/22

Sistemi embedded

- Cosa sono e perché meritano di essere studiati?

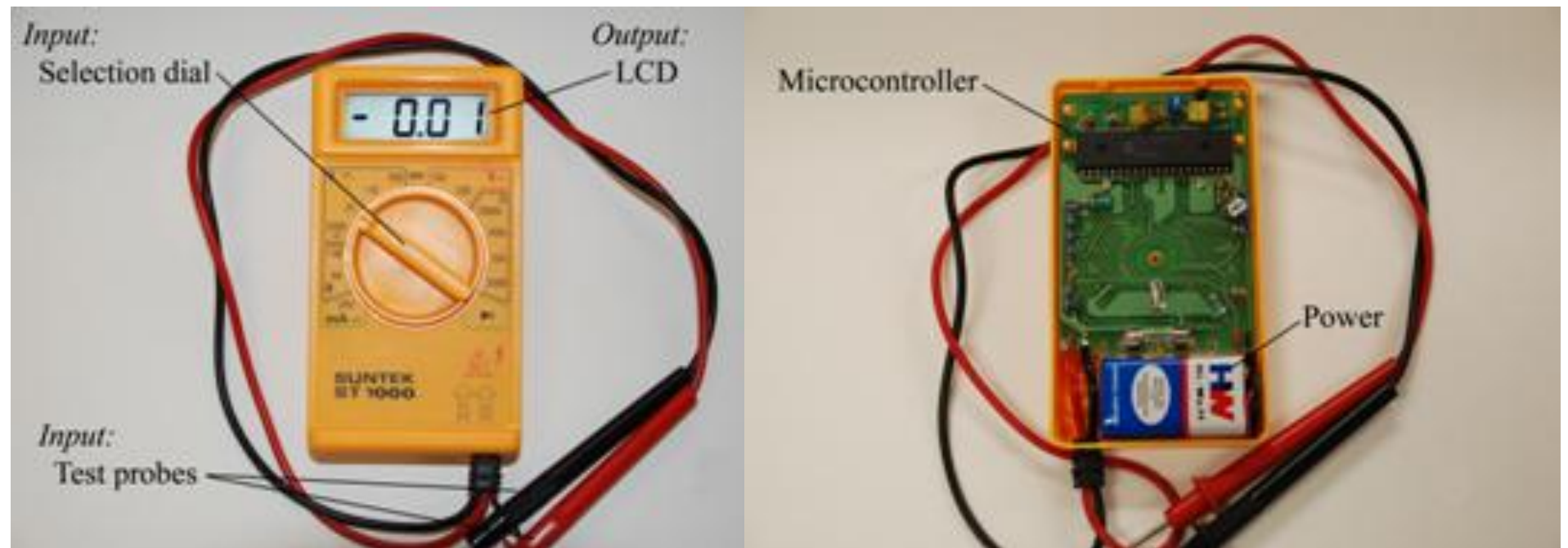
Sistemi embedded

- Cosa sono e perché meritano di essere studiati?
 - Sono dappertutto
 - Oltre a conoscenze del dominio applicativo ed un po' di hardware, richiedono molte competenze software => servono competenze informatiche

Un multimetro



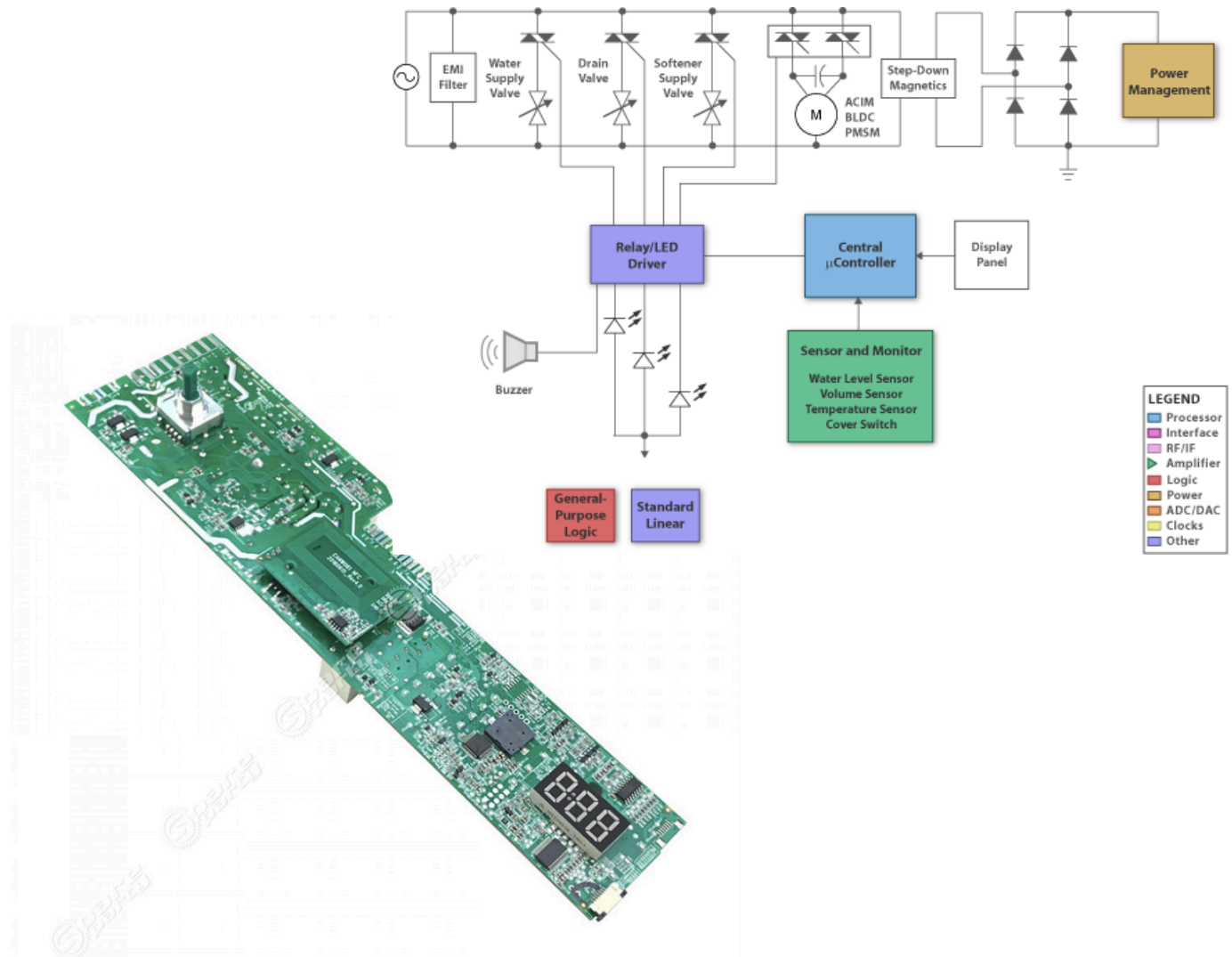
Un multimetro



Una lavatrice



Una lavatrice

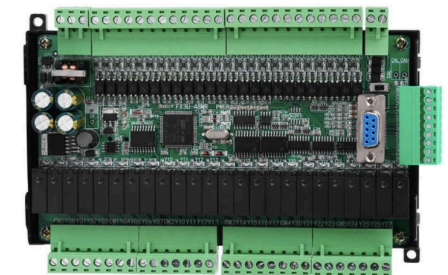
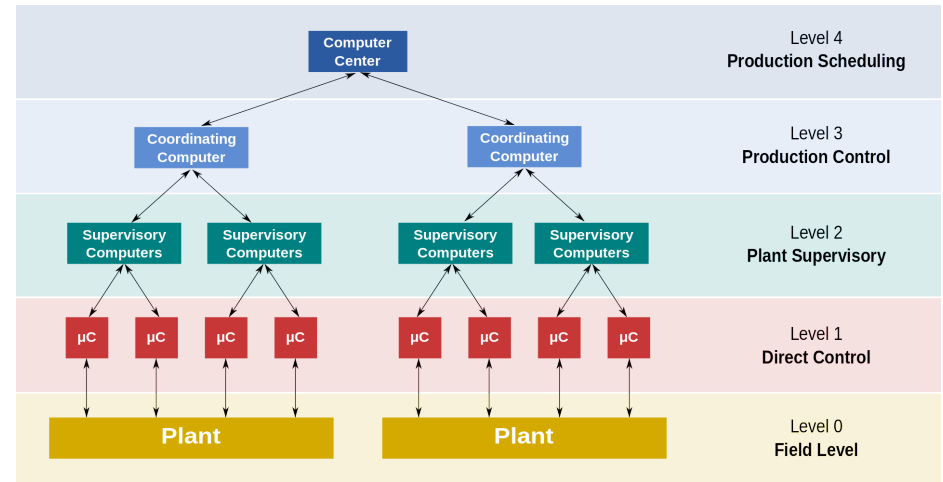


SCHEDA ELETTRONICA ORIGINALE LAVATRICE CANDY

Un impianto industriale



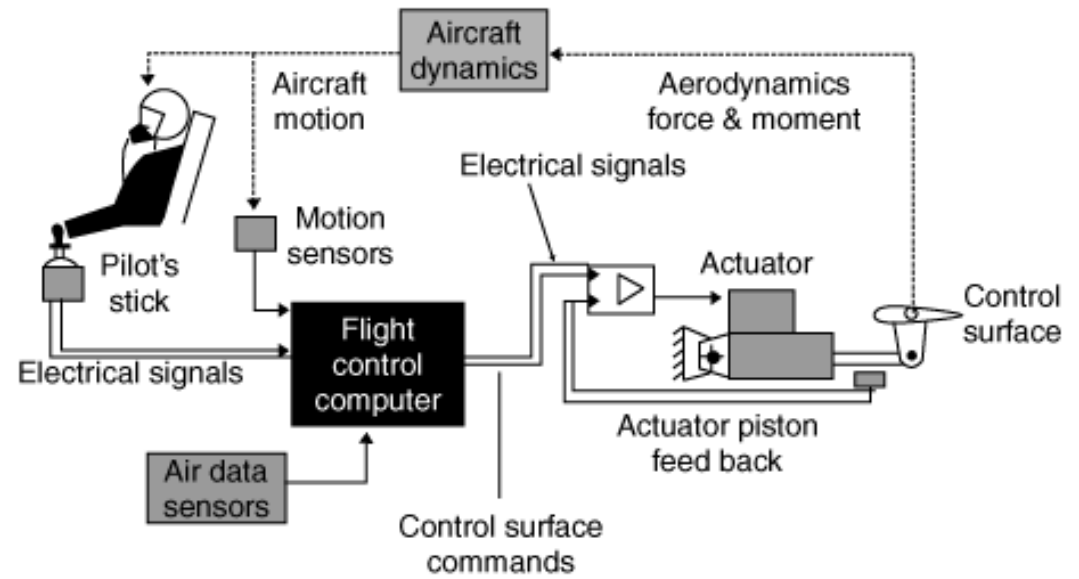
Un impianto industriale



Un aereo passeggeri



Un aereo passeggeri



Cosa hanno in comune?

- Sono sistemi con una rilevante componente fisica
- Che contengono (uno o più) calcolatori
- I quali elaborano informazione
- Che è prodotta/consumata dal processo fisico

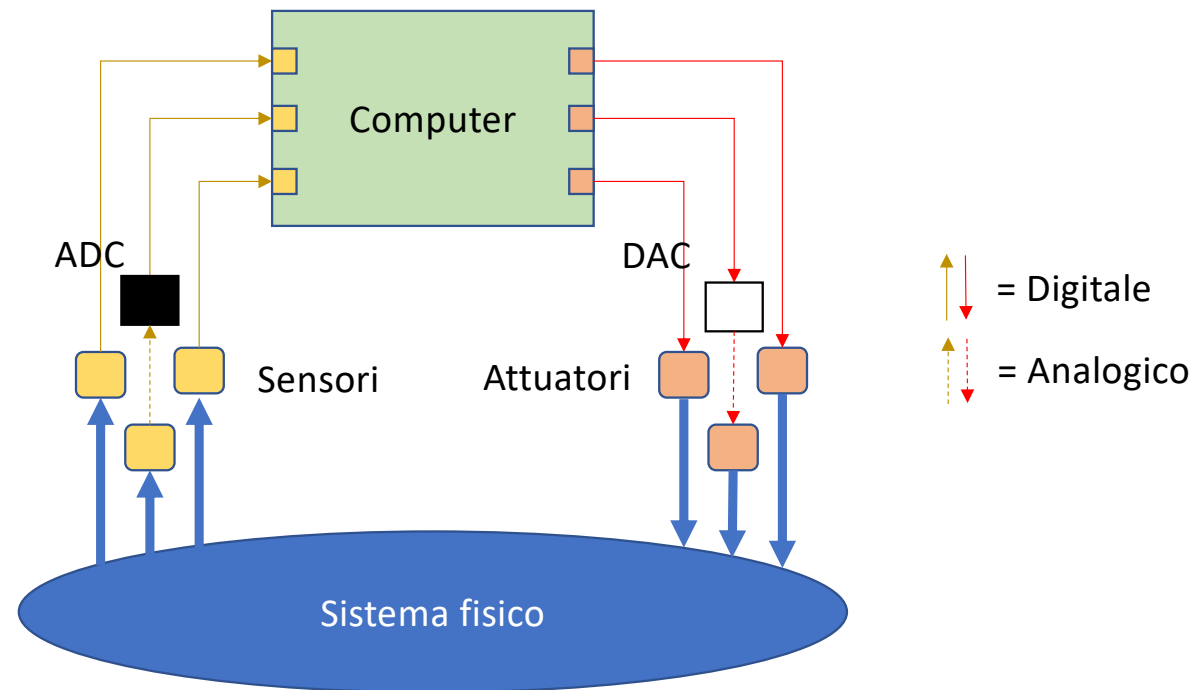
Questi sistemi vengono detti
sistemi embedded o **sistemi cyber-fisici**

“electronic programmable sub-systems that are generally an integral part of a larger heterogeneous system” [ART2005].

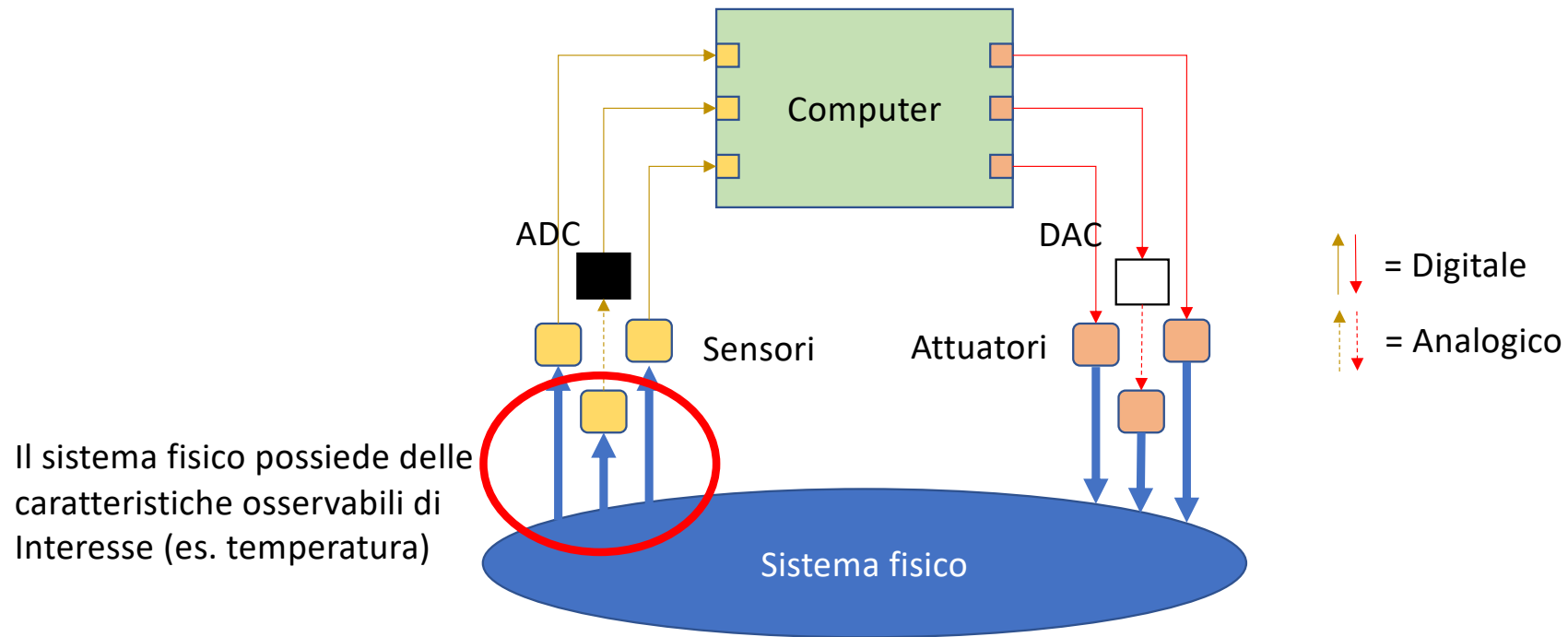
Caratteristiche salienti

- Il processo fisico influenza la computazione e viceversa (feedback)
- La computazione deve avvenire
 - In maniera **reattiva**: computazione in reazione a input dal processo fisico
 - In maniera **concorrente**: diversi fenomeni del processo fisico che scatenano la computazione reattiva possono avvenire contemporaneamente
 - In **tempo reale**: l'output deve essere prodotto in un tempo compatibile con la dinamica del processo fisico
 - dinamica del processo / costante di tempo,
 - tempo compatibile non è necessariamente un tempo molto breve.

Struttura

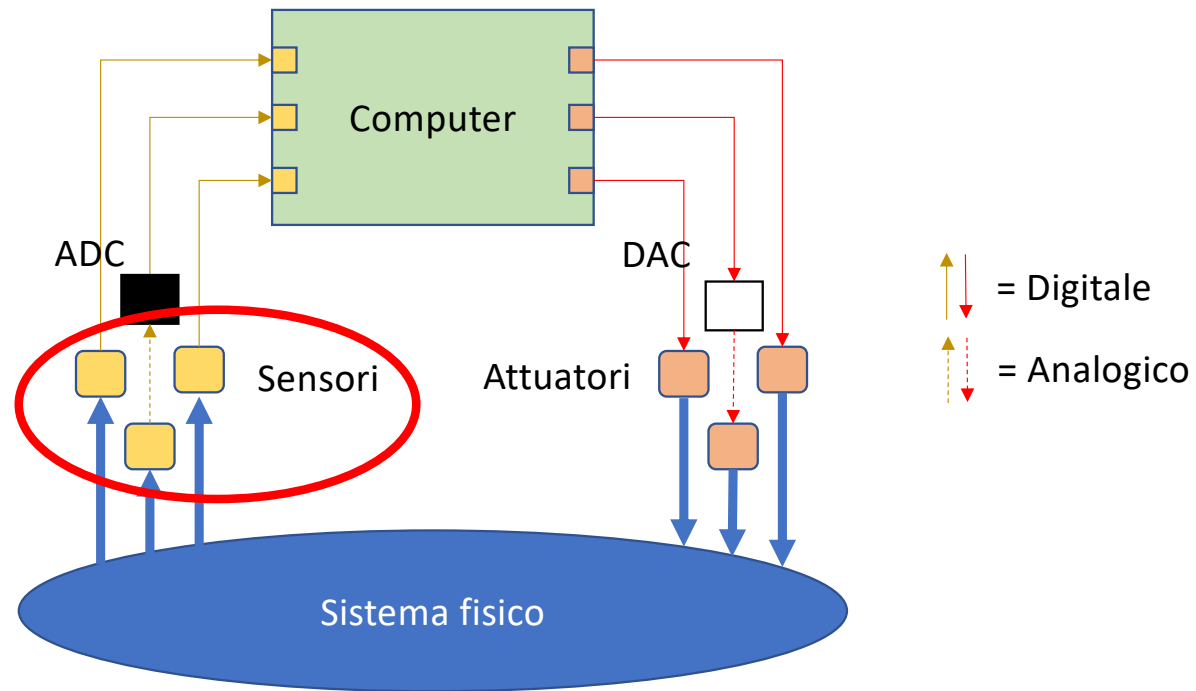


Struttura



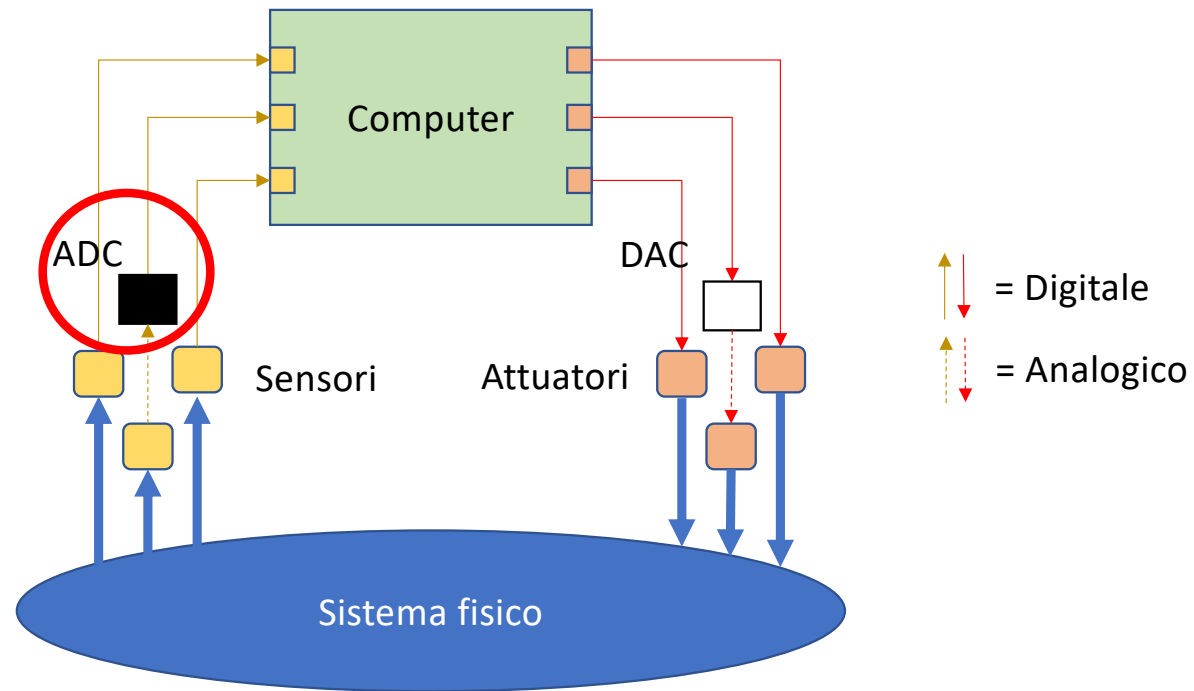
Struttura

I **sensori** misurano tali caratteristiche e le convertono in segnali digitali o analogici



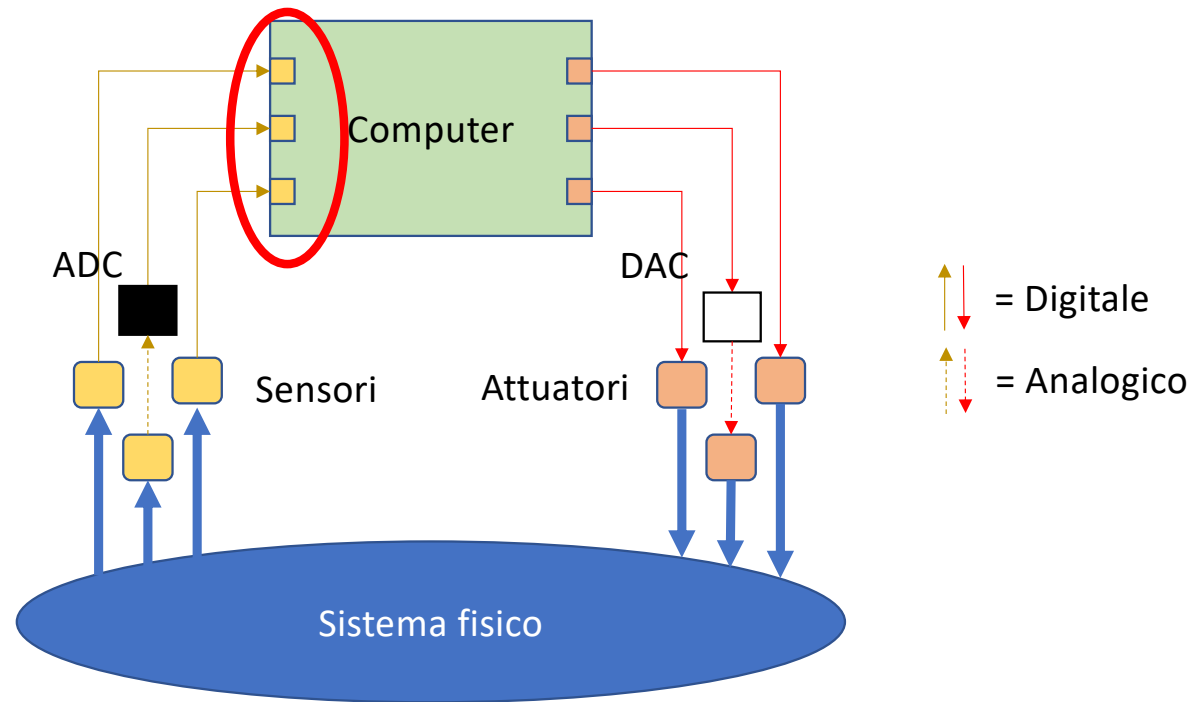
Struttura

I segnali analogici vengono convertiti in segnali digitali

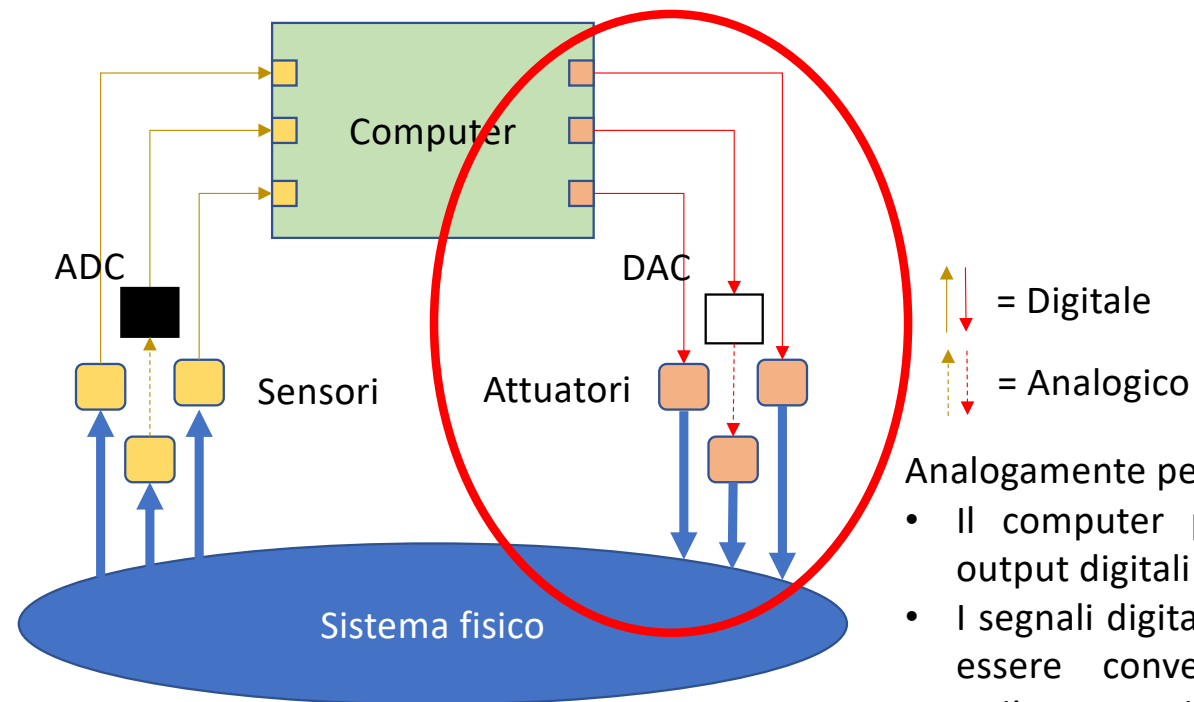


Struttura

Il computer accetta in input i segnali digitali prodotti



Struttura



Analogamente per gli output:

- Il computer produce segnali di output digitali
- I segnali digitali potrebbero dover essere convertiti in analogici, se l'attuatore lo richiede
- Gli **attuatori** convertono i segnali in grandezze fisiche (es. coppia), comunque analogiche

Un mondo di sistemi embedded (1)

- Automotive
 - Controllo trazione e trasmissione
 - Assistenza alla guida
 - Entertainment e comunicazione
- Avionica (circa 50% costo di un aereo)
 - Controllo superfici di volo
 - Navigazione
 - Comunicazione
 - Manutenzione
 - Applicazioni militari (sistemi d'arma, sistemi tattici)

Un mondo di sistemi embedded (2)

- Automazione industriale
 - Controllo impianti
 - Logistica
- Telecomunicazioni
 - Smartphones
 - Apparati di comunicazione digitale
- Consumer electronics
 - Forni a microonde, lavatrici, lavastoviglie, frigoriferi, televisori...
 - Domotica
- Medicina
 - Pacemakers
 - Radiodiagnostica e radioterapia
 - ...

Internet of Things e Industria 4.0

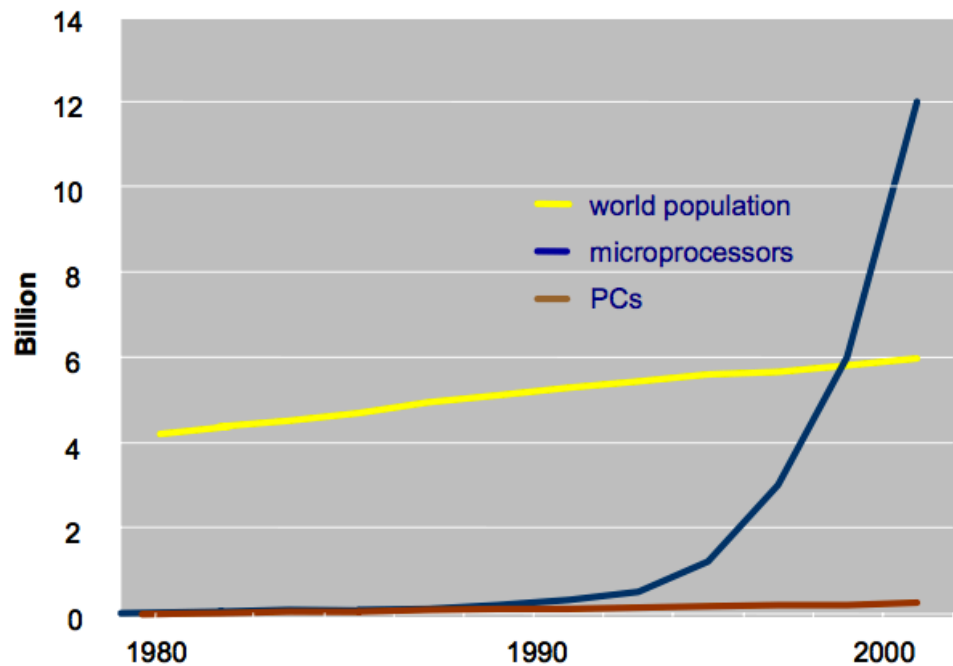
- Convergenza con tecnologie di comunicazione
- Internet of Things (IoT):
 - Sistemi embedded + tecnologie Internet
 - Accesso a sensori ed attuatori via PAN → LAN → MAN → WAN
 - Possibilità per i sistemi embedded di interagire tra di loro (M2M)
 - E con servizi esterni
- Industria 4.0:
 - IoT per i sistemi industriali
 - Integrazione con data analytics e business intelligence

Il valore dei sistemi embedded

Industry sector	Annual global value	ES value (%)	ES value	EC growth (%)	ES growth (%)
Automotive	800 b€	40%	320 b€	10%	10%
Avionics/Aerospace	750 b€	50%	370 b€	5%	14%
Industrial automation	200 b€	55%	110 b€	5%	7%
Telecommunications	1000 b€	55%	550 b€	9%	15%
Consumer electronics and intelligent homes	300 b€	60%	180 b€	8%	15%
Health and medical systems	130 b€	40%	50 b€	?	18%
Total	3180 b€		1580 b€		

From <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd129911.aspx>: Estimated total value, through 2006, and growth, through 2010, of major industry sectors using embedded systems
 (ES = embedded systems, EC = electronic components)

La pervasività dei sistemi embedded



The worldwide number of microprocessors [Bies2005] as an indicator for the penetration of embedded systems

- 2004: circa 2 processori per persona sulla terra, previsti circa 3 per il 2010 [BuildAR2004]
- 2005: Il 98% dei processori prodotti sono usati in sistemi embedded [EmbC2005].

Progettare sistemi embedded

- Ormai riconosciuta come una disciplina a sè
 - Non è solo “programmare un computer più piccolo”
 - Ma pone delle sfide ingegneristiche peculiari e complesse
- La complessità è dovuta alla varietà dei domini applicativi
 - Nota: I sistemi embedded sono di norma special-purpose
 - (ma spesso costituiti da componenti general-purpose)
- Ogni tipo di applicazione pone requisiti diversi
- Questi dettano le scelte progettuali

Tipologie di requisiti

- Efficienza
- Flessibilità
- Affidabilità
 - **Business-critical**: mette a rischio la riuscita del business
 - **Safety-critical**: mette a rischio vite umane
- Vincoli real-time
- Grado di interazione con l'uomo
- Mercato

Efficienza

- L'**efficienza** è la caratteristica di un sistema che porta a termine il proprio funzionamento con un quantità limitata di risorse
- Alcuni attributi:
 - Peso
 - Dimensioni fisiche
 - Consumo energetico
 - Occupazione di memoria del software
 - Grado di riuso
 - Costo

Flessibilità

- Molti sistemi embedded real-time sono soggetti ad un insieme di requisiti che evolve nel tempo, dovuti a modifiche nel sistema stesso, nelle richieste del mercato, nell'ambiente in cui il sistema deve operare, etc.
- La capacità del sistema di accomodare soluzioni a nuovi requisiti, diversi da quelli per cui è stato progettato, è chiamata flessibilità.
- Un importante aspetto non-funzionale di un sistema embedded real-time è che il progetto dovrebbe essere abbastanza flessibile da consentire di adattarsi ad evoluzione dei requisiti con un costo minimo.

Affidabilità

- L'**affidabilità** è la caratteristica di un sistema il cui funzionamento produce gli effetti voluti o scostamenti accettabili da questi
- I sistemi safety-critical richiedono un'affidabilità molto elevata:
 - Controllo centrali nucleari
 - Controllo superfici di volo aerei
 - Impianti di frenata automobili, ABS, airbag...
 - Pacemakers
- Questo perché l'impatto del loro funzionamento sull'ambiente (persone, cose...) è spesso immediato e profondo

Attributi di affidabilità

- **Correttezza:** il sistema rispetta i requisiti
- **Robustezza:** il sistema si comporta accettabilmente anche in situazioni non specificate nei requisiti
- **Sicurezza (security):** il sistema impedisce usi non autorizzati
- **Innocuità (safety):** il sistema non ha comportamenti pericolosi
- Occorre valutare e dare priorità ai diversi attributi in fase di progettazione e orientare la progettazione in maniera da rispettare tali valutazioni

Vincoli real-time

- Nei sistemi non embedded il tempo di computazione è essenzialmente una delle dimensioni dell'efficienza
- In certi domini applicativi embedded vi possono essere vincoli real-time
- I vincoli real-time determinano l'affidabilità del sistema
 - Una risposta esatta arrivata in ritardo è una risposta sbagliata, es. se ABS di un autoveicolo interviene in ritardo compromette la safety

Da applicazioni a requisiti (1)

- Esempio: forno a microonde
 - Mercato saturo, necessità di minimizzare i costi
 - Dimensioni sull'ordine della decina di centimetri, peso diversi chili
 - Nessun vincolo energetico
 - Limitata affidabilità
 - Interazione con uomo attraverso un'interfaccia semplice (pulsanti e visore a cristalli liquidi)
- Esempio: acceleratore di particelle per radioterapia
 - Costo dell'ordine di svariati milioni di Euro, mercato molto piccolo
 - Dimensioni: diversi metri, bunker + postazione esterna per tecnico/medico
 - Nessun vincolo energetico
 - Safety-critical: occorre evitare sovradosaggio

Da applicazioni a requisiti (2)

- Esempio: smartphone
 - Costo: dipendente dal mercato di riferimento
 - Dimensioni: pochi centimetri, peso: tra 10^2 e 10^3 grammi
 - Stringenti vincoli energetici e termici
 - Integra diverse funzionalità (chiamata e piattaforma applicativa general-purpose)
 - L'affidabilità di alcune funzionalità (chiamata telefonica) è business-critical
- Esempio: monitoraggio e controllo grid distribuzione energia elettrica
 - Mercato molto piccolo, sistemi mediamente costosi
 - Dimensioni: intere regioni geografiche
 - Nessun vincolo energetico
 - Da business-critical a safety-critical

Alcune dimensioni progettuali

- Piattaforma (HW + SW)
 - Microprocessore (MPU)
 - Microcontrollore (MCU)
 - Digital signal processor (DSP)
 - Logica programmabile (PLD, FPGA)
 - ASIC
- Scelta linguaggi, librerie o real-time OS
- Numero di componenti (centralizzazione vs. distribuzione)
- Quantità e tipo di memoria (SRAM, DRAM, ROM, FLASH)
- Velocità di calcolo (frequenza clock CPU)
- Batteria

Da requisiti a scelte progettuali (1)

- Le piattaforme ASIC sono le più performanti, compatte ed efficienti dal punto di vista energetico, ma le meno flessibili e le più costose
 - Ad es., meno software e quindi meno memoria (spazio occupato, consumo)
 - Potenzialmente più affidabile di una soluzione software
- Costo ASIC:
 - Costo up-front per progetto: elevato, ma può essere ridotto con il riuso (IP)
 - Costo di produzione in serie: molto basso
- La soluzione ASIC può essere considerata in caso di mercati di massa, ma non è flessibile, i.e., non è praticabile se si vuole poter aggiornare la funzionalità dopo il deployment

Da requisiti a scelte progettuali (2)

- Linguaggio e librerie/OS:
 - La programmazione «a macchina nuda» (bare-bones) e l'uso del linguaggio macchina può permettere una maggiore efficienza (meno memoria, maggiore velocità, ma è sempre meno vero / rilevante, ad esempio programmando in C, per cui ci sono compilatori molto efficienti)
 - Riduce però la scalabilità ed aumenta il rischio di avere un'affidabilità bassa
- Numero componenti:
 - Una soluzione centralizzata è potenzialmente meno costosa e più affidabile (nessuna sincronizzazione) di una distribuita
 - Ma se il sistema ha dimensioni elevate può essere meno affidabile (rumore sulle linee) e meno efficiente (peso) di una distribuita

Da requisiti a scelte progettuali (3)

- Memoria:
 - Le memorie ROM e FLASH sono meno costose delle RAM, di solito sono utilizzate per il codice (che non cambia o cambia sporadicamente)
 - Le memorie DRAM sono meno costose e hanno una maggiore densità delle memorie SRAM, ma sono anche più lente e dissipano più energia
 - Maggior memoria permette di realizzare più funzionalità in maniera centralizzata, con possibile risparmio di costo
 - Allo stesso tempo significa maggiore occupazione di area e costo del componente
- Velocità di calcolo:
 - Permette più facilmente di soddisfare i vincoli real-time e di realizzare più funzionalità in maniera centralizzata, con un potenziale risparmio di costo
 - D'altra parte maggiore velocità di calcolo significa maggior costo del componente, minore efficienza, e potenzialmente più peso e volume (dissipazione calore)
- Batteria:
 - Deve fornire sufficiente energia per alimentare tutto il sistema
 - Allo stesso tempo più è capace, maggiore è il suo peso, volume e costo

Tornando agli esempi... (1)

- Forno a microonde:
 - Principale driver: minimizzazione costi
 - Una soluzione basata su un microcontrollore a 8 bit è sufficiente
- Acceleratore per radioterapia:
 - Principale driver: safety
 - Soluzione distribuita basata su MCU a 32 bit per l'impianto con ridondanza hardware, più postazione standard PC per interfacciarsi a software di treatment planning

Tornando agli esempi... (2)

- Smartphone:
 - Principali driver: costi, dimensione, peso, efficienza energetica
 - Diversi tipi di dispositivi hardware: ASIC + IP per codec radiofrequenza, DSP per audio/video processing, MPU per applicazioni; possibile SoC integra le diverse funzionalità
- Monitoraggio e controllo grid distribuzione energia elettrica:
 - Principali driver: costi, vincoli real-time, flessibilità, robustezza
 - Sistema fortemente distribuito, con unità locali basate su MPU + sistema operativo real-time e rete di comunicazione; centrali operative basate su standard PC