

CONTROLLI AUTOMATICI (L-Z)
Ingegneria Meccanica e Ingegneria del Veicolo

<http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti/ControlliAutomatici.html>

CONTROLLI AUTOMATICI
INTRODUZIONE

Ing. Luigi Biagiotti

e-mail: luigi.biagiotti@unimore.it

<http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti>

Corso di Sistemi di controllo

- Materiale didattico:

<http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti/ControlliAutomatici.html>

- Testi di riferimento:

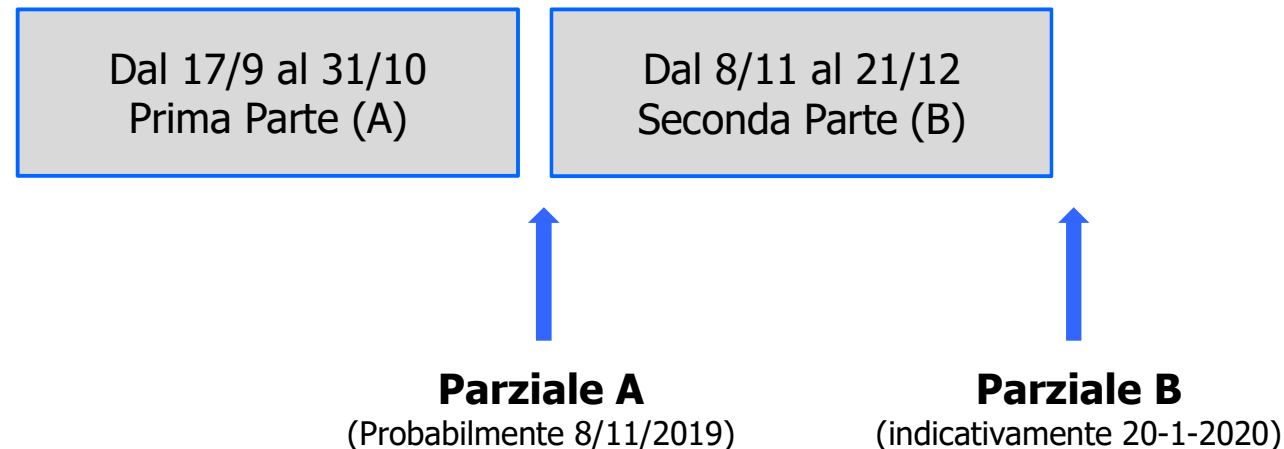
- P. Bolzern, R. Scattolini, N. Schiavoni, “Fondamenti di Controlli Automatici”, Mc Graw-Hill ed.
- K. Ogata, L. Biagiotti, “Fondamenti di Controlli Automatici”, Pearson (quando disponibile)

- Ricevimento:

- previo appuntamento tramite e-mail (fino al 31-12-2019 preferibilmente al lunedì mattina).

Organizzazione del corso di Controlli Automatici

- Il corso si compone di due parti (A e B) che saranno oggetto di distinte verifiche



- A partire dal mese di gennaio 2018 le verifiche della parte A e della parte B si succederanno alternandosi:

Parziale A	Parziale B
Gennaio 2020	Febbraio 2020
Febbraio 2020	Aprile 2020
Giugno 2020	Giugno 2020
Luglio 2020	Luglio 2020
Settembre 2020	Settembre 2020

Modalità d'esame e voto

- Il voto finale dell'esame di **Controlli Automatici** si ottiene mediando i risultati (in 33-esimi senza arrotondamenti) dei due esami A e B e arrotondando il voto all'intero più vicino (**non è possibile svolgere la parte B senza aver prima superato la A**).
- Superata la parte A è possibile ripetere più volte la parte B senza perdere il **voto della A** (che **ha validità annuale**). Occorre in questo caso rifiutare il voto attribuito dal docente tramite la verbalizzazione su esse3. Notare che la parte A non dà luogo a verbalizzazione.
- Coloro che hanno svolto il corso di **Fondamenti di Controlli Automatici alla triennale** di questo Ateneo ma hanno nel proprio piano di studi Controlli Automatici (9CFU) possono richiedere di svolgere la sola parte B. In questo caso dovranno preparare una tesina utilizzando Matlab/Simulink su un argomento concordato col docente.
- Gli esami dei due distinti **gruppi A-K, L-Z** si svolgono in contemporanea, ma prevedono prove leggermente diverse, pertanto è necessario iscriversi e svolgere l'esame del proprio docente di riferimento (**non sono ammessi scambi**)

Articolazione del corso

- **Analisi:**
 - Introduzione al problema del controllo
 - Sistemi fisici e modelli
 - Trasformata di Laplace e Funzioni di Trasferimento
 - Stabilità e analisi della risposta temporale di sistemi dinamici elementari
 - Analisi Armonica
- **Sintesi:**
 - Introduzione al controllo
 - Analisi dei sistemi in retroazione
 - Progetto regolatori

Che cos'è l'automazione?



Winner 2014 of the Video Clip Contest of the IEEE Control Systems Society

Introduzione

- Significato del termine **Controllo**
 - **Azione** su una macchina, un apparato, un impianto, un processo per **modificarne** (migliorarne) il comportamento
- Più antico sistema di controllo:

Uomo

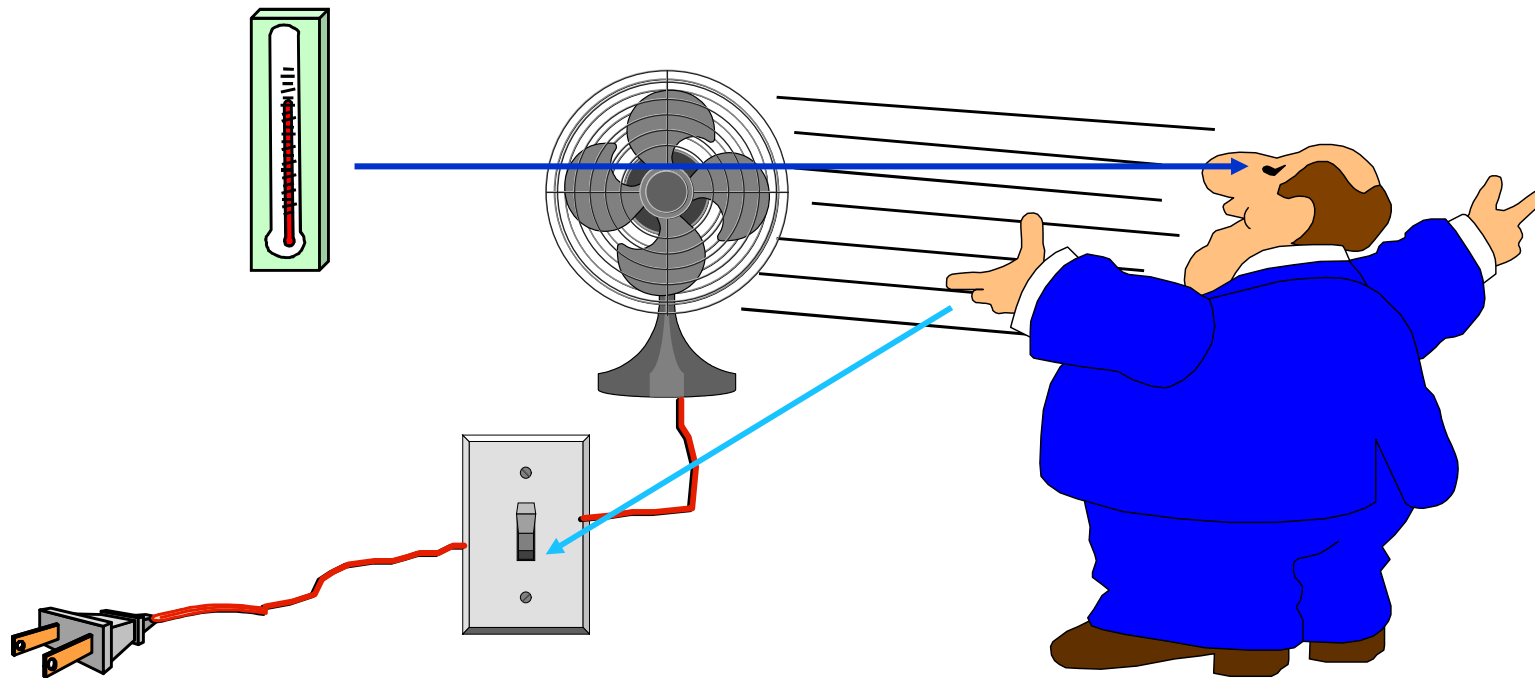
- Alcuni esempi di attività umane dove il controllo è elemento indispensabile
 - camminare
 - suonare il pianoforte
 - guidare l'automobile
 -



Introduzione

Esempi di azioni di controllo eseguite dall'uomo

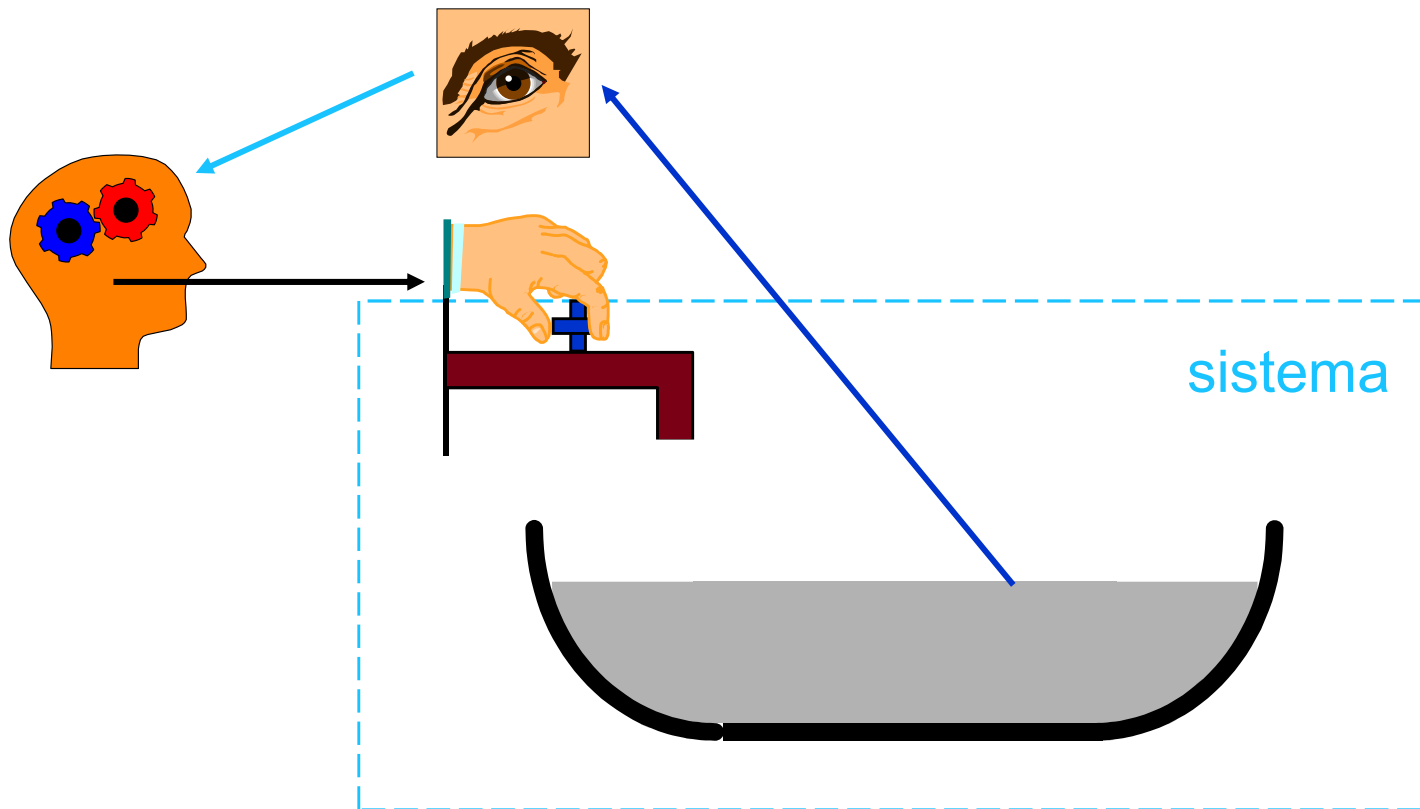
- Controllo (manuale) di temperatura



Introduzione

Esempi di azioni di controllo eseguite dall'uomo

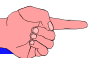
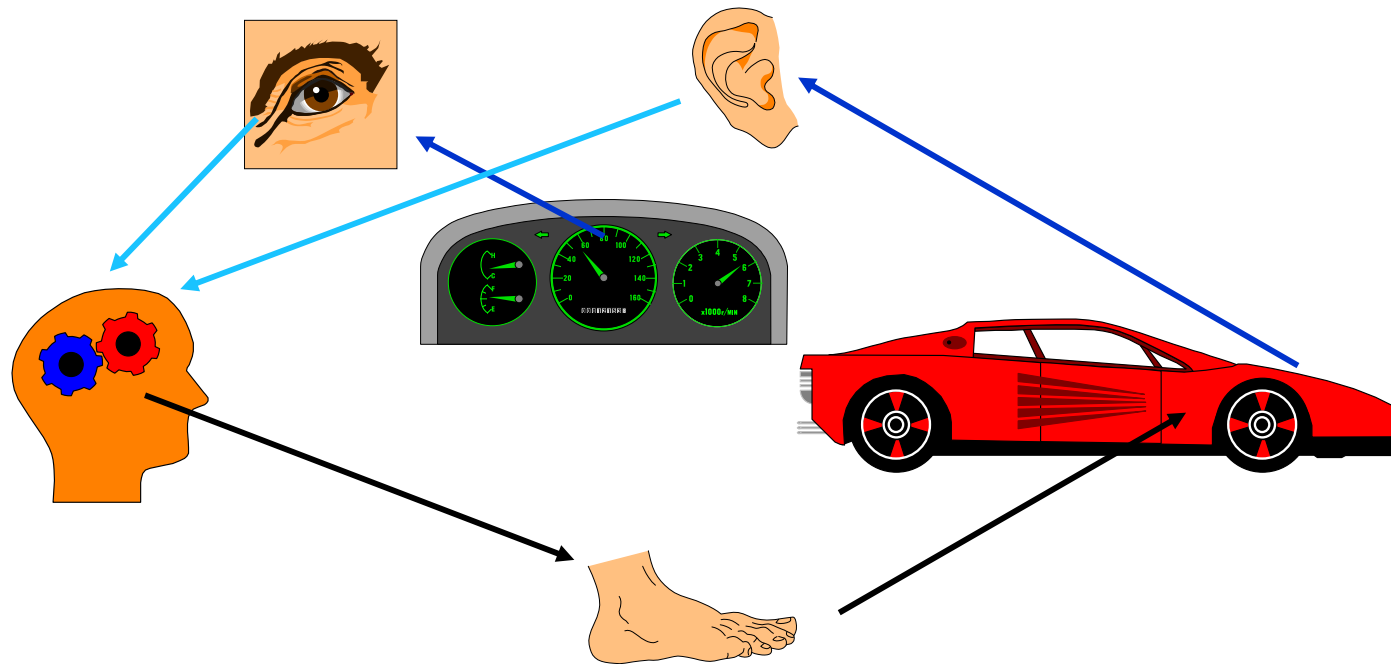
- Controllo (manuale) di livello



Introduzione

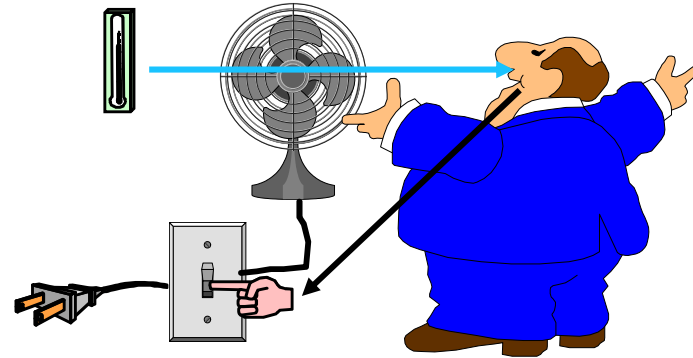
Esempi di azioni di controllo eseguite dall'uomo

- Controllo (manuale) di velocità



Introduzione

- Considerazioni riassuntive



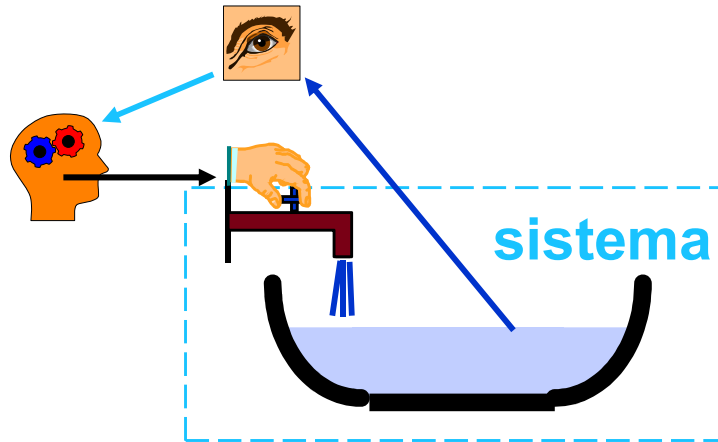
**Controllo in catena aperta
(anello aperto, azione diretta)**

**azione basata su un modello ed
informazioni iniziali**

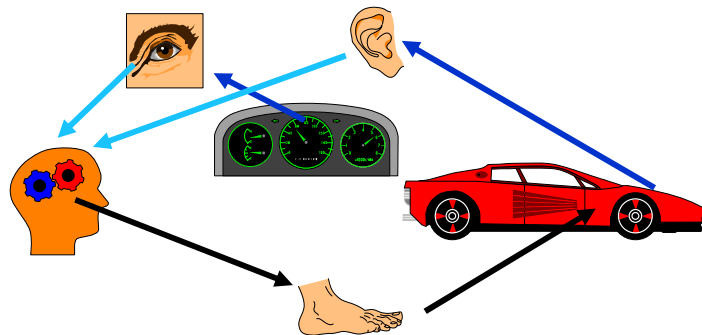


Introduzione

- Considerazioni riassuntive



**Controlli in retroazione
(catena chiusa, anello chiuso)**

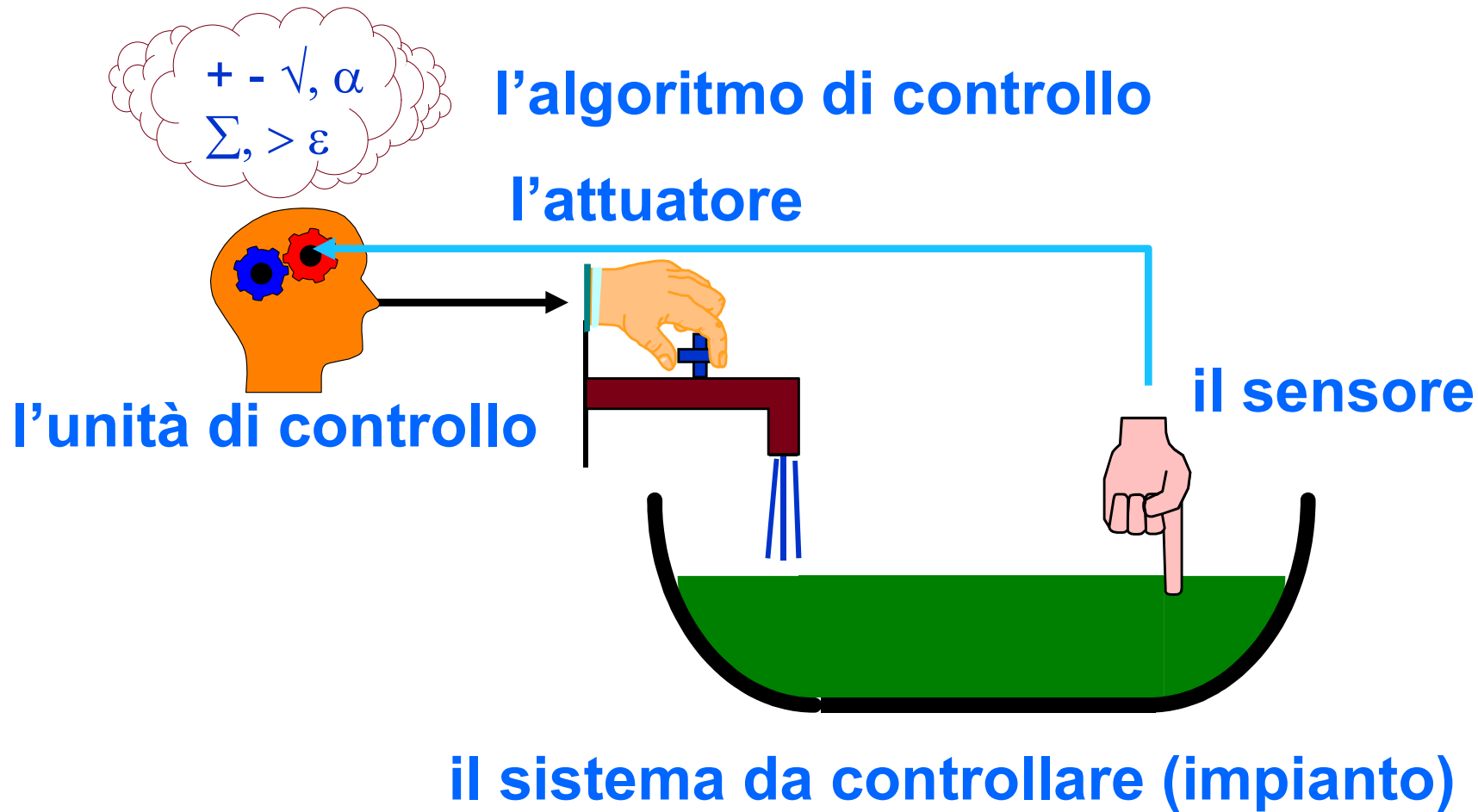


**azione basata su
un modello e
su informazioni
continue
dal sistema**



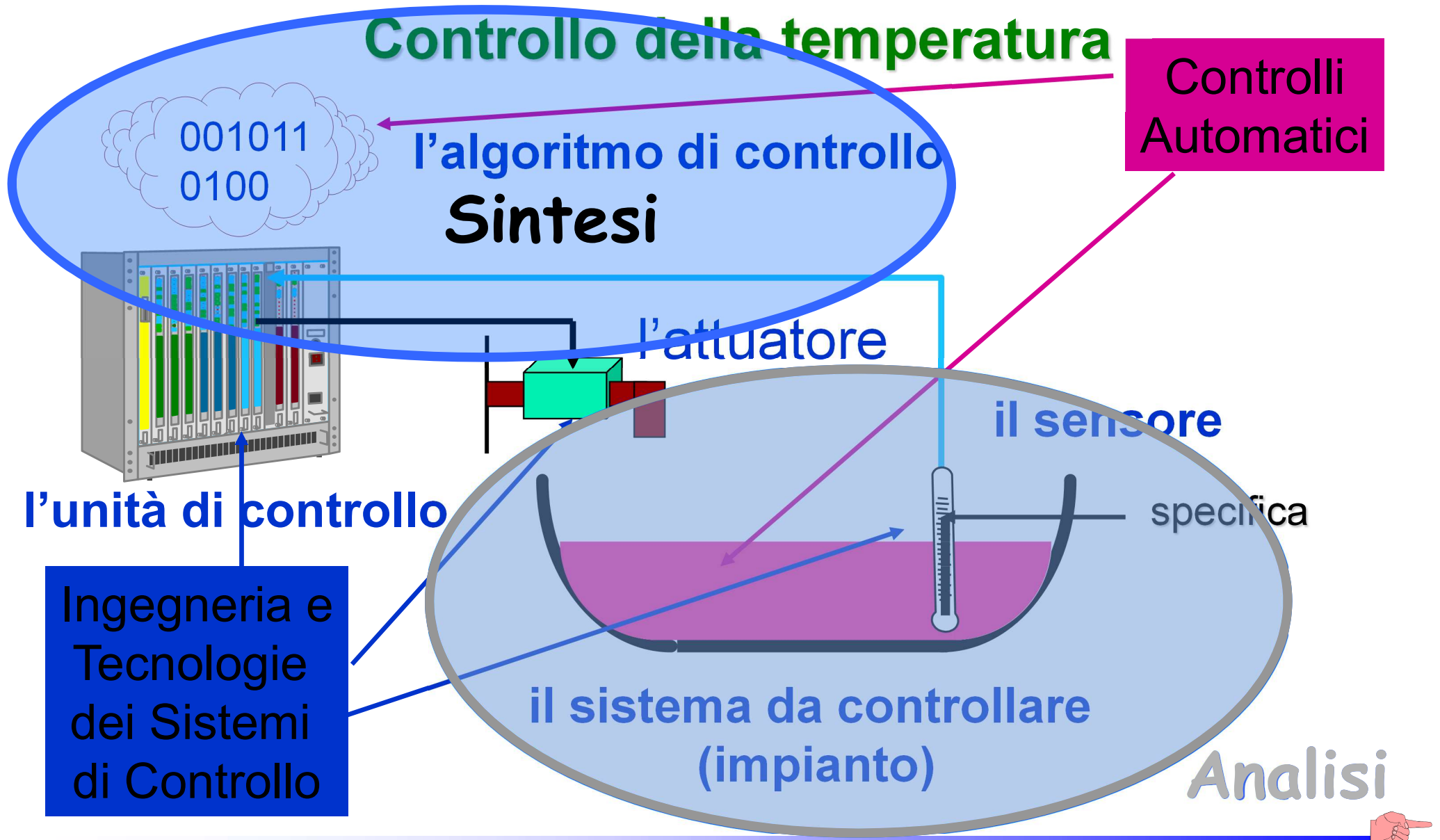
Introduzione

- Elementi chiave di un sistema di controllo



Introduzione

- Dal Controllo Manuale al Controllo Automatico



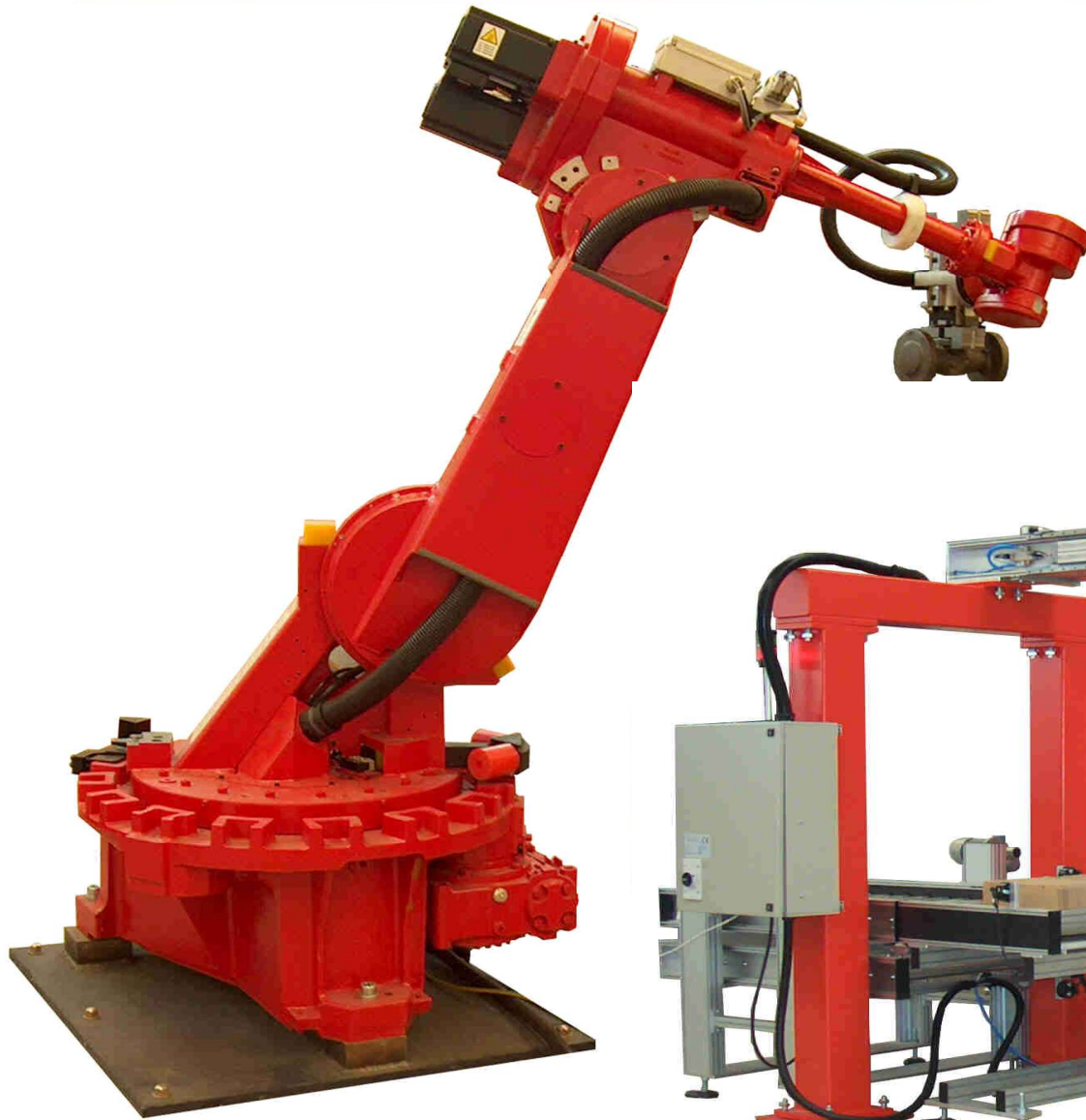
Dove sono applicati i controlli automatici?

- **Tipicamente i controlli automatici sono impiegati per:**
 - ottenere elevate velocità di esecuzione,
 - gestire grandi potenze,
 - ottenere precisioni non ottenibili dall'uomo,
 - eseguire operazioni ripetitive,
 - operare in ambienti remoti o potenzialmente pericolosi.

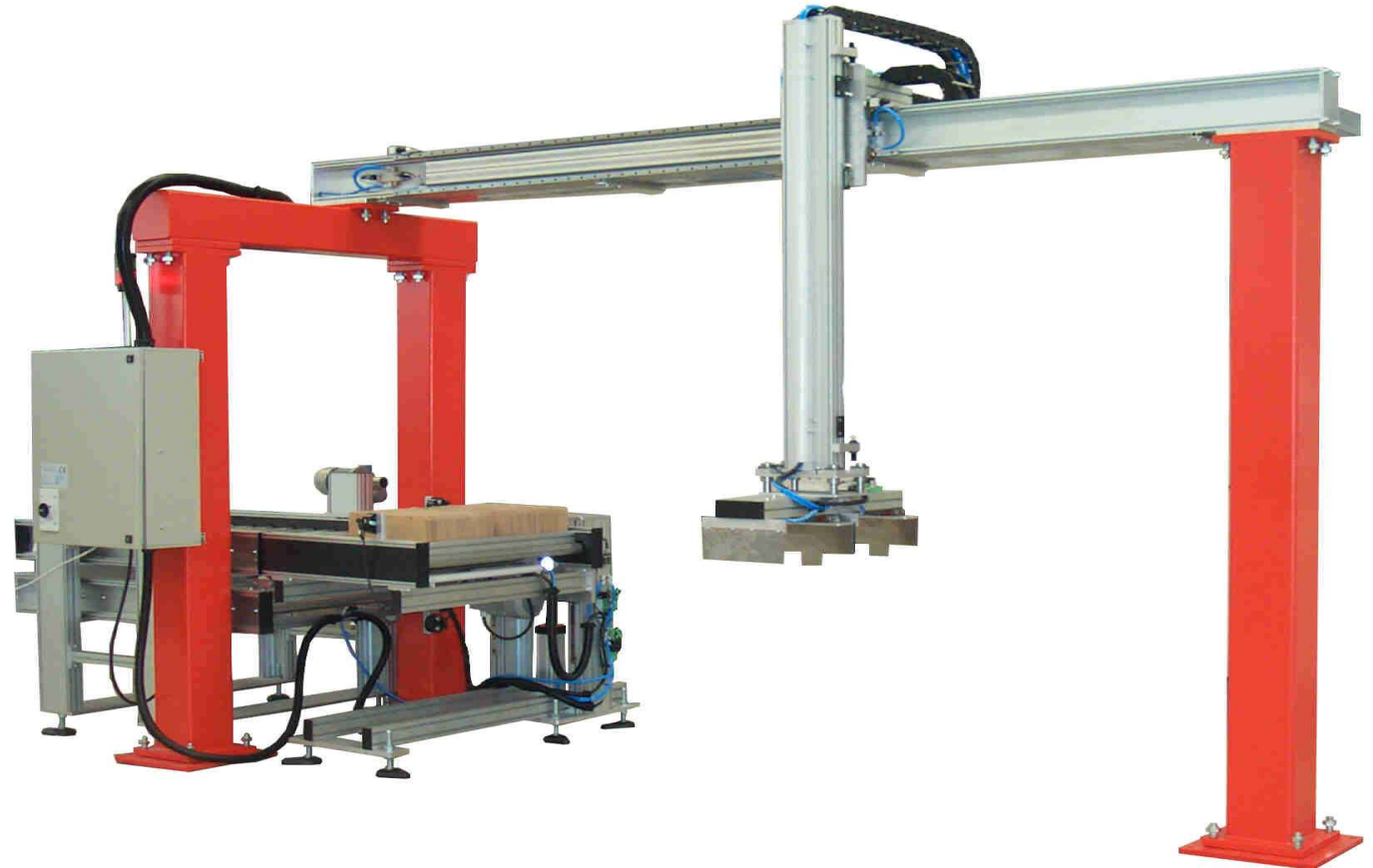
Perche i controlli automatici a ingegneria meccanica?

- La quasi totalità dei dispositivi meccanici sono controllati elettronicamente (robot, impianti industriali, automobili,...).
- Due curiosità:
 - Più dell'80% dei dispositivi su un'automobile sono controllati (o controllabili) elettronicamente: motore, frizione, cambio, differenziale, sospensioni, freni, tergicristalli, climatizzazione,...
 - C'è più potenza di calcolo su un'automobile di media cilindrata che sull'Apollo 11 che ha permesso all'uomo di arrivare sulla luna!

Esempio: robot per lavorazioni industriali



- velocità
- potenza
- precisione
- instancabili!



Esempio: centri di lavorazione a controllo numerico



- elevata precisione
- flessibilità di utilizzo
- instancabili!

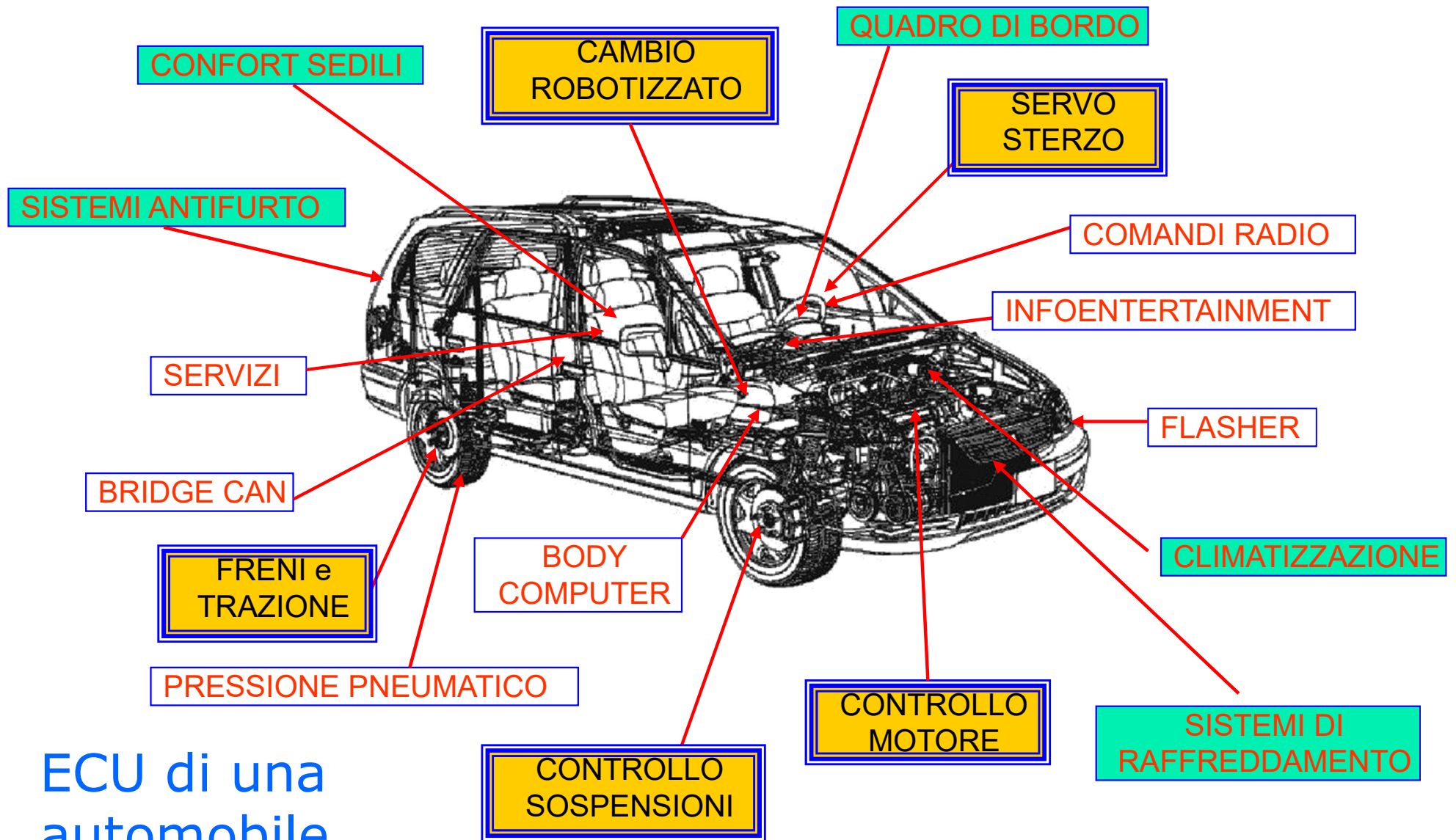


Esempio: veicoli agricoli

- Il controllo elettronico dei principali dispositivi di una macchina agricola permette migliori prestazioni e maggior comfort durante il lavoro.



Esempio: automobili



ECU di una automobile

Esempio: automobili

Più dell'80% dei dispositivi su un'automobile sono controllati (o controllabili) elettronicamente. Alcuni sistemi di controllo:

- Freni: ABS – ASR - EBD
- Stabilità: ESP
- Motore: MSR - ...
- Trazione - TC
- Frizione e cambio - AMT
- Differenziale
- Partenza - LC
- Steer-by-wire
- Drive-by-wire
- ...



Esempio: automobili

In un'auto ibrida i flussi di potenza tra motore a combustione interna, batterie e ruote sono determinati dal controllo del motore a combustione e del motore elettrico.



Esempio: automobili

L'autopilota estremizza il concetto di guida assistita oggi presente su molte automobili di fascia alta



Esempio: aeronautica

- Senza i dispositivi di controllo un aereo è un sistema INSTABILE!



Esempio: nuovi sistemi di locomozione

- Senza controllo il SEGWAY è un sistema INSTABILE!



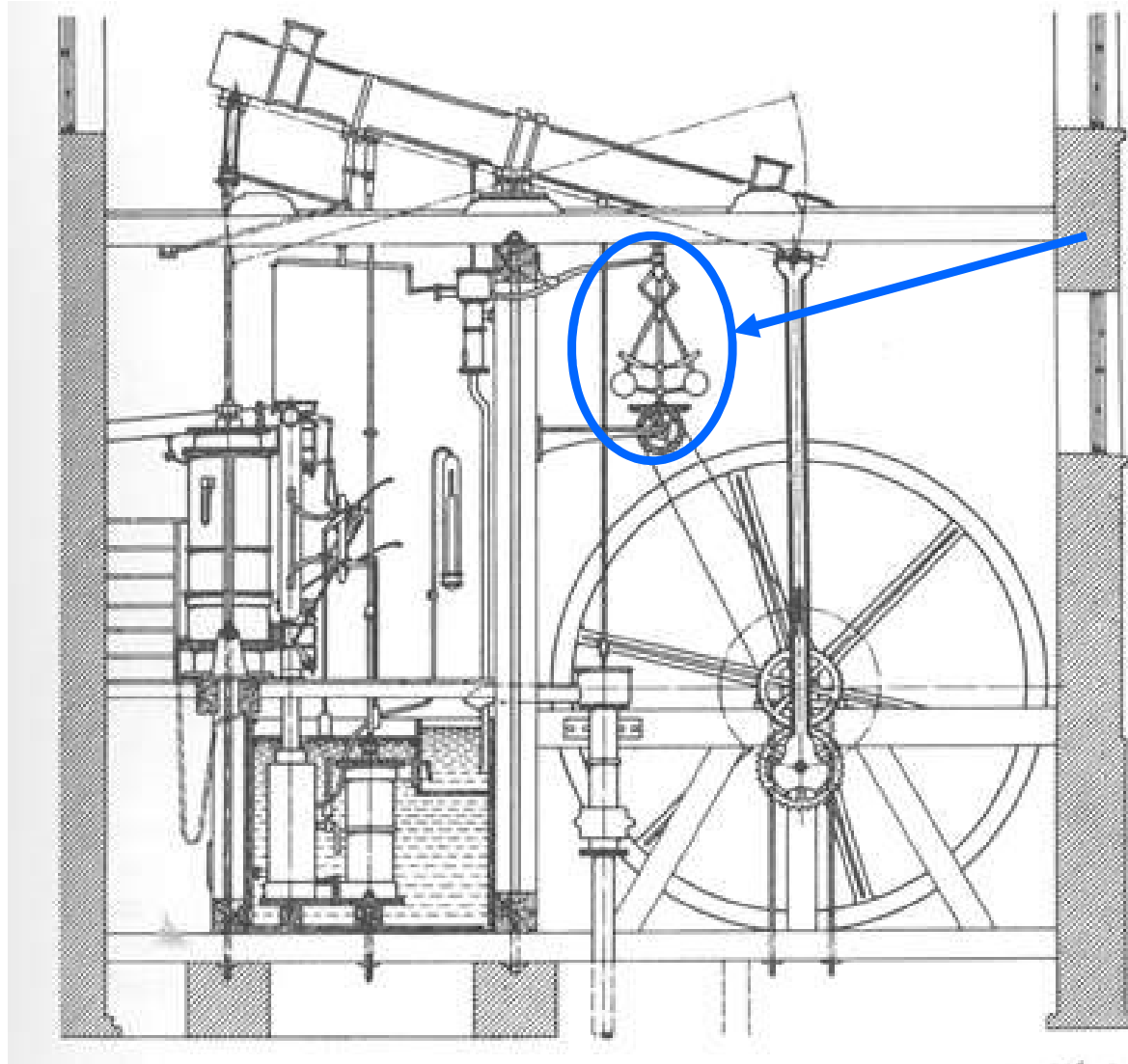
Esempio: sonde e satelliti

- controllo di potenze enormi: la propulsione a razzo è un'esplosione controllata!
- operazione in ambienti remoti e pericolosi: temperature estreme, raggi cosmici, assenza dell'atmosfera terrestre,...
- elevata autonomia: un segnale dalla terra a marte impiega almeno 20 minuti!



Non solo controllo "elettronico"...

- ...ma anche meccanico
 - Motore a vapore di J. Watt (1798 ca), con controllo automatico



**Controllo automatico
della velocità**

Un po' di storia (recente)

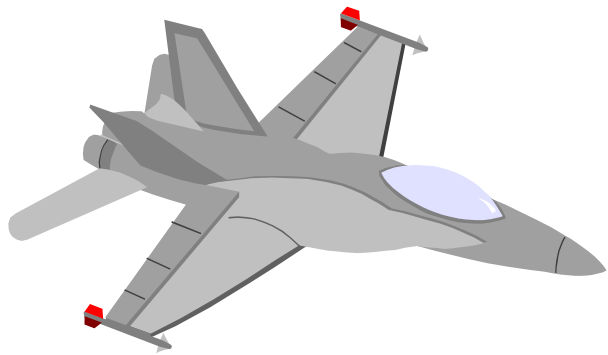
- Anni 40 (II Guerra mondiale: controllo dell'antiaerea) -> modelli e metodi di controllo i/o, filtraggio di Wiener, Analisi in Frequenza
- Anni 60 (corsa allo spazio, controllo assetto missile, posizionamento satelliti) -> modelli nello spazio degli stati, analisi e controllo nel tempo, filtraggio di Kalman
- Anni 80 (sviluppo delle TLC e mezzi di calcolo piu' avanzati, space shuttles) -> controllo robusto, studio dell'incertezza
- Anni 00 (Guerra in afganistan/Iraq) -> controllo cooperativo, robots, uavs...
- Anni 10 (sviluppo dell'intelligenza pervasiva, smartphones) -> droni, controllo distribuito, IoTs, fabbrica 4.0

Terminologia

- Sistema

- insieme costituito da più parti (sottosistemi) tra loro interagenti di cui si vuole indagare il comportamento
 - astrazione di comodo

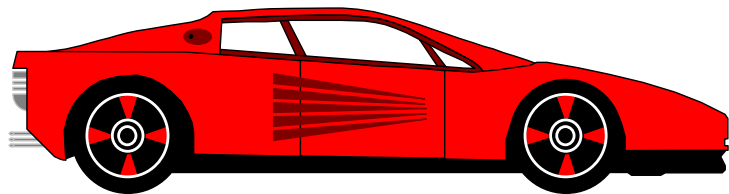
- Esempi di sistemi



aereo supersonico

Sottosistemi:

reattore, ali, flaps, pressurizzazione, ...



automobile sportiva

Sottosistemi:

motore, sospensioni, freni, ...

I sottosistemi sono a loro volta sistemi: dipende dal livello di dettaglio della analisi svolta



Terminologia

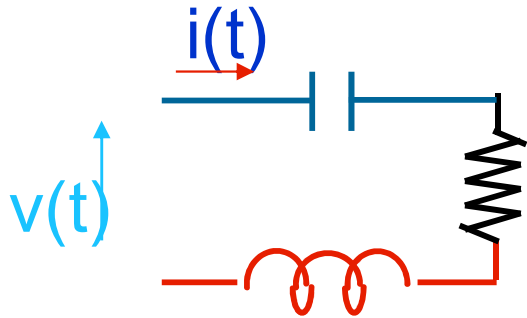
- Collegamento
 - interazione del sistema con il resto del mondo
- Classificazione dei collegamenti con il mondo esterno
 - ingressi
 - azioni che il resto del mondo effettua sul sistema. In generale sono in grado di modificarne il comportamento
 - ingressi di controllo (su cui agiamo)
 - ingressi di disturbo (su cui non possiamo o non vogliamo agire)
 - uscite
 - risultati esterni (effetti) delle azioni e dell'evoluzione temporale del sistema dovuta a condizioni iniziali

In molti casi l'attribuzione ad un collegamento della natura di ingresso o di uscita è arbitrariamente fatta dal progettista per sua convenienza o scelta.



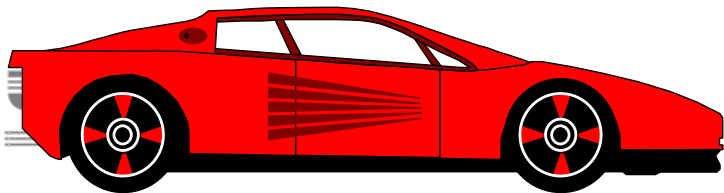
Terminologia

- Esempi di orientamento



qual'è l'ingresso ?
qual è l'uscita?

Dipende dalla scelta del progettista ciascuna delle due variabili $i(t)$ e $v(t)$ può assumere entrambi i ruoli



La coppia erogata dal motore è un ingresso o una uscita ?

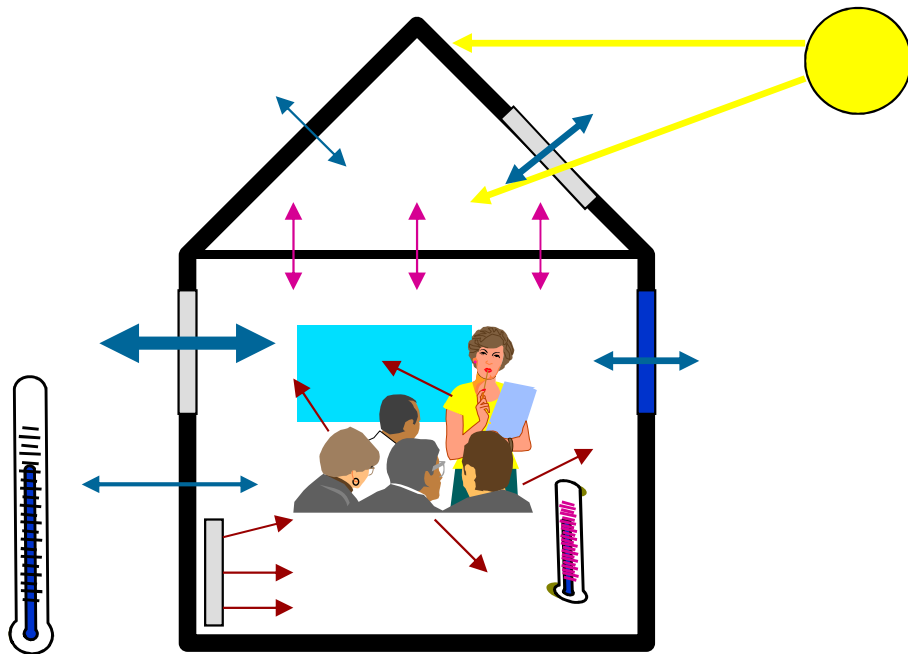
Per l'intero **veicolo** è un ingresso
per il **sottosistema** motore è una uscita

In un sistema complesso alcune uscite di sottosistemi sono ingressi di altri sottosistemi.



Terminologia

- Ingressi di controllo e di disturbo
Es. riscaldamento dell'aula



Ingressi di disturbo

temperatura esterna

Irraggiamento solare

potenza termica generata dalle persone

Uscita

temperatura della stanza

Ingresso di controllo

potenza termica immessa dai radiatori



Terminologia

- **Controllo**
 - azione su un sistema per imporgli comportamenti desiderati
- **Attenzione!**
 - Talora in italiano il termine Controllo è usato per indicare una attività di semplice osservazione
 - in termine tecnico: **monitoraggio**
- **Controllo Automatico**
 - azione di controllo esplicita automaticamente da una macchina



Terminologia

- **Modello**

- rappresentazione (fisica o astratta) approssimata di un sistema costruita per uno scopo
 - per un sistema possono essere costruiti infiniti modelli
- riproduce solo i comportamenti e le proprietà che interessano

- **Segnale**

- grandezza fisica o astratta associata per comodità di manipolazione ad una grandezza fisica
 - ad una grandezza fisica possono essere associati infiniti segnali
- riproduce solo i comportamenti e le proprietà che interessano
 - di solito non ha associata una potenza
 - tensione senza corrente, velocità senza forza,...
- Modelli e segnali sostituiscono i corrispondenti sistemi e grandezze fisiche nelle manipolazioni formali



Terminologia

- Tipologie di modello

- **fisico**

- in scala, ..

- per lo studio del comportamento

- **comportamentale**

- descrizione a parole, ..

- per la comprensione del sistema

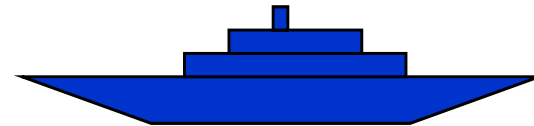
- per il progetto di semplici sistemi di controllo

- **descrittivo**

- schemi, disegni, ..

- per il progetto

- per la costruzione



Terminologia

- Tipologie di modello

- **matematico**

$$a_m \frac{d^m y}{dt^m} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_n \frac{d^n u}{dt^n} + \dots + b_0 u$$

- sistemi di equazioni (differenziali)

$$v(t) = Ri(t)$$

- per la formalizzazione di leggi fisiche
- per lo studio al calcolatore del comportamento (simulazione)
- per la previsione
- **per il controllo**



Sistemi e Modelli

- *Modello matematico*: Descrizione della struttura e dell'evoluzione del sistema mediante simboli matematici. Le grandezze caratteristiche di un sistema sono classificate come:
 - *parametri*, che descrivono la struttura fisica e sono solitamente costanti: valore di una resistenza, massa di una trave, caratteristiche geometriche di un robot, ...
 - *variabili*, che descrivono il variare di una grandezza del sistema: corrente elettrica, posizione o velocità di un corpo nello spazio, temperatura di un forno, livello di un liquido in un contenitore, ...

$$v(t) = R i(t) \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{ll} R & \text{parametro} \\ v(t), i(t) & \text{variabili} \end{array}$$

- I parametri e le variabili di un modello matematico (sistema) sono espressi da numeri (interi, reali o complessi) con o senza dimensioni. Le loro interdipendenze sono definite da relazioni matematiche.

Sistemi e Modelli

- *Modelli da leggi fisiche*: legge di Ohm, legge di Newton, legge di Boyle, ... relazioni matematiche che interpretano determinate relazioni di causa-effetto in sistemi fisici, e che derivano da sintesi di teorie o da congetture;
- *Modelli "black-box"*: per sistemi particolarmente complessi (economici, sociali, ambientali, ...) non sono definite regole matematiche di comportamento. In questi casi sono definiti modelli matematici basati sull'osservazione dei soli dati sperimentali (*scatola nera*: si ignora il contenuto della scatola).

Sistema \neq Modello!

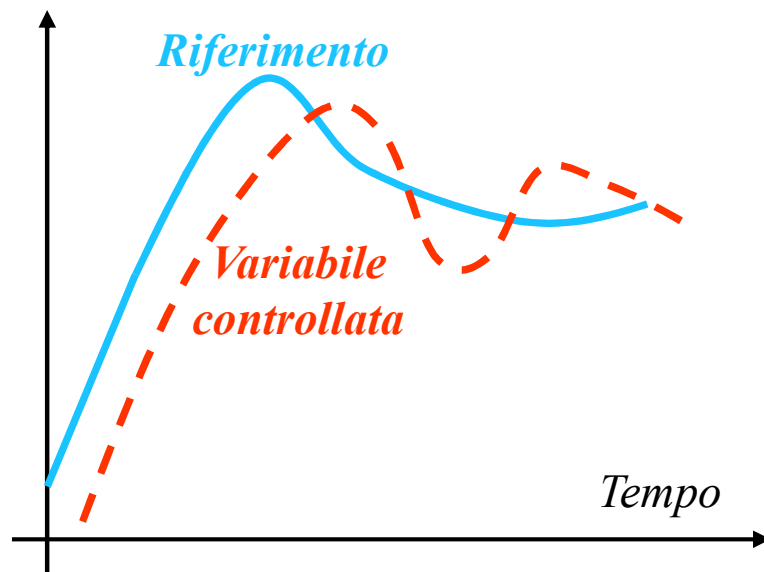
- Ad uno stesso sistema è possibile associare più di un modello, in base sia al particolare problema che si deve risolvere sia al tipo di precisione che si intende raggiungere.

Ogni modello è una descrizione approssimata di un dato sistema.

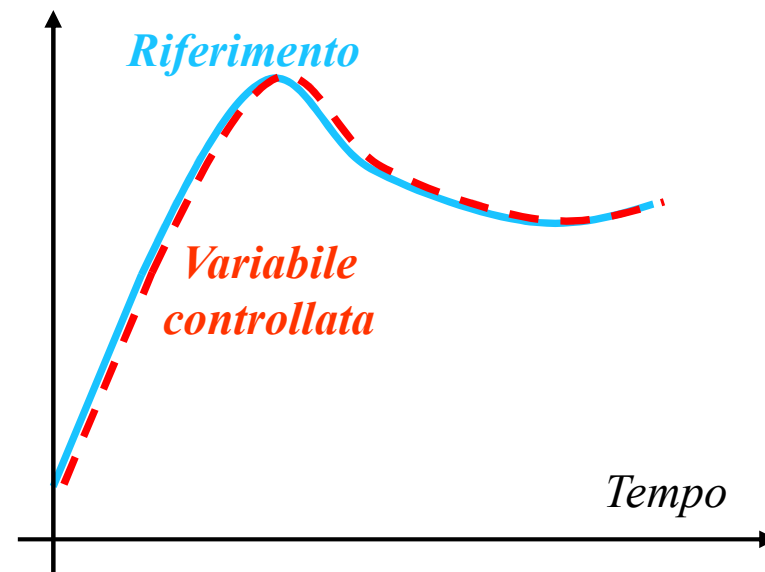
- Comunemente, si intende con il termine *sistema* sia il sistema fisico vero e proprio, sia il modello matematico con il quale viene descritto.

Obiettivo base di un sistema di controllo

- Da un punto di vista formale l'obiettivo base di un sistema di controllo è fare in modo che l'andamento temporale delle variabili da controllare sia più simile possibile all'andamento dei segnali di riferimento (che rappresentano ciò che il sistema deve eseguire).



Sistema di controllo scadente



Buon sistema di controllo

Introduzione al Controllo

Elementi fondamentali per il progetto di un sistema di controllo.

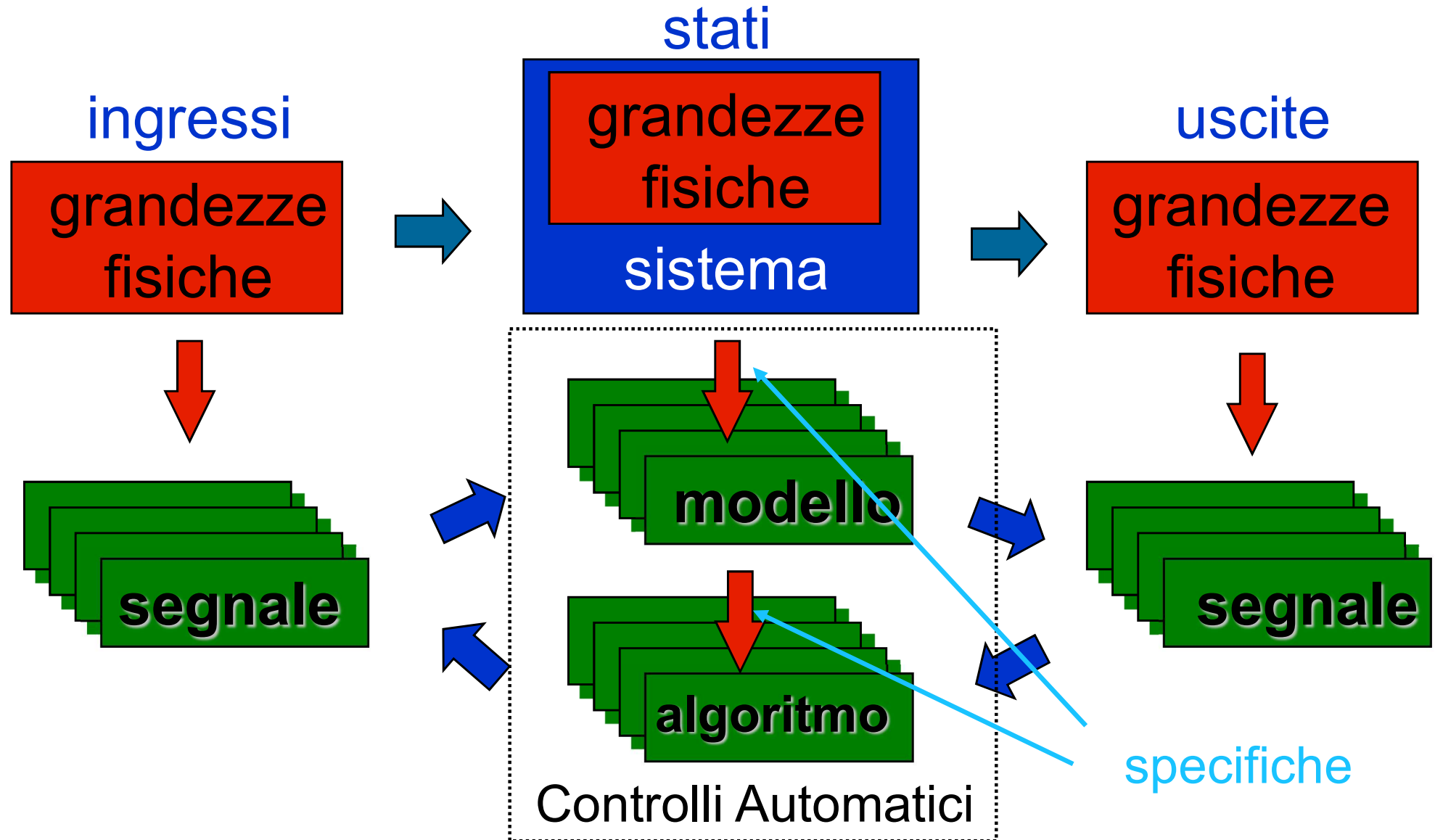
Occorre:

1. **definire i segnali** corrispondenti alle grandezze fisiche interessate dal controllo
2. **costruire un modello** del sistema (in generale un impianto o una macchina)
3. **stendere le specifiche di progetto** per il sistema controllato
4. **progettare un algoritmo di controllo** basato sul modello del sistema, sui segnali disponibili e sulle specifiche
 - gli algoritmi di controllo che si imparano a progettare nei vari corsi di Controlli Automatici sono, in realtà, il modello del sistema di controllo (vero) da costruire
5. **verificarne il comportamento** mediante tecniche di simulazione
6. **realizzare il sistema fisico** che implementa il controllo
 - corso di Ingegneria e Tecnologie dei Sistemi di Controllo



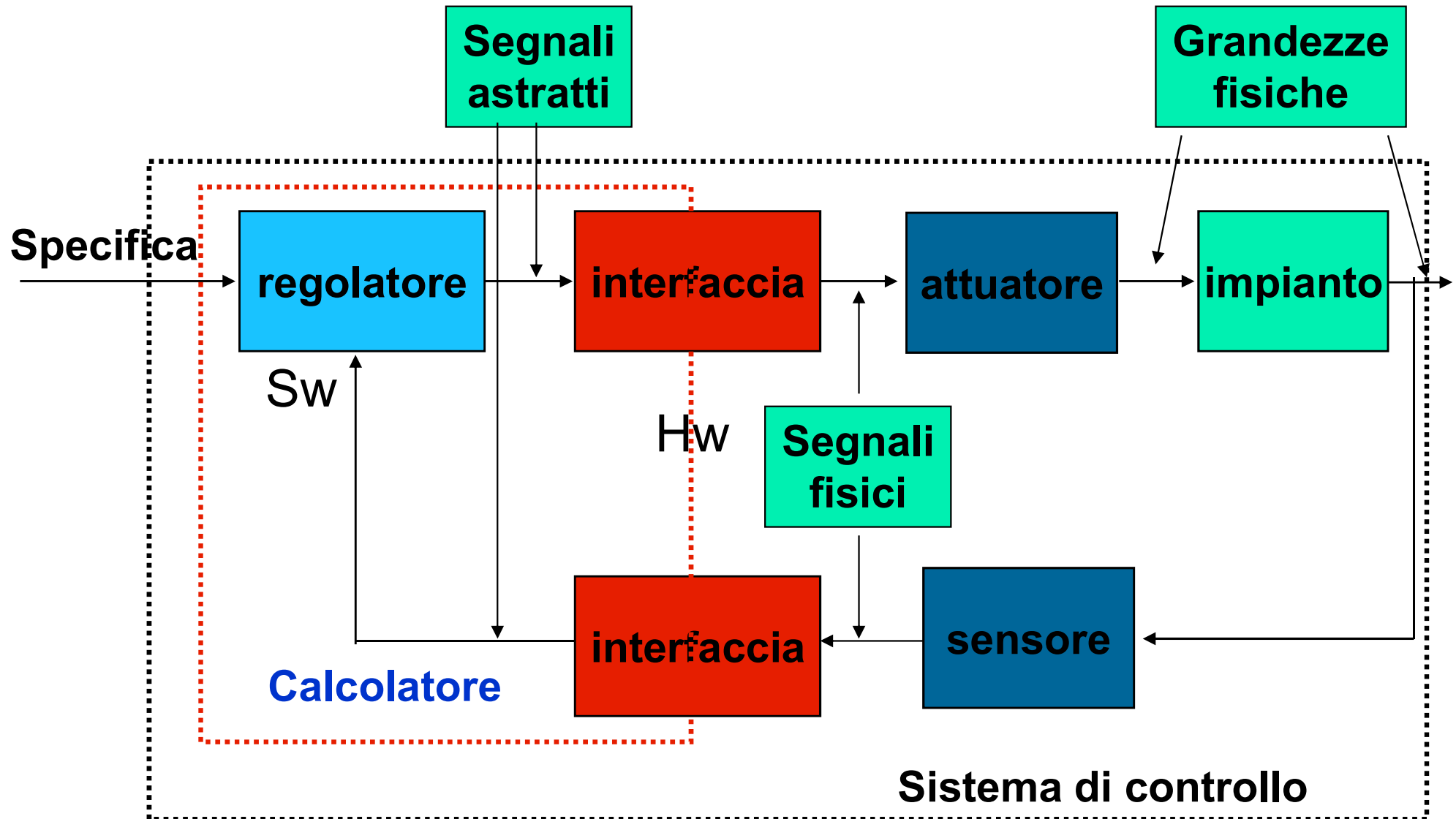
Introduzione al Controllo

- Concettualizzazione a blocchi



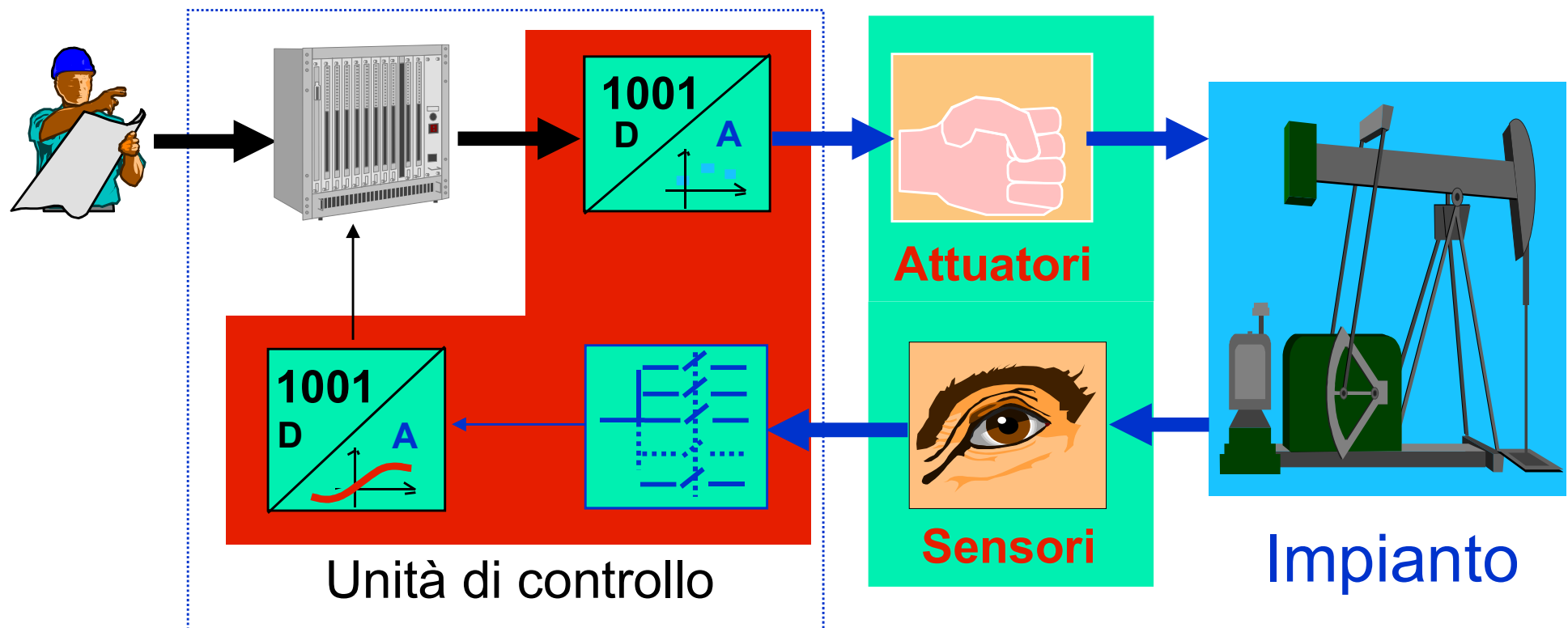
Introduzione al Controllo

- Schema a blocchi di un sistema di controllo



Introduzione al Controllo

- Schema tecnologico di un sistema di controllo



Motivazioni del Controllo

Controllare significa agire sull'impianto per modificarne il comportamento

- Esempio: Controllo della temperatura di una stanza
 - perché controllo
 - condizioni operative variabili
 - temperatura esterna
 - irraggiamento solare
 - numero di persone
 - specifiche variabili
 - temperatura interna desiderata che varia in funzione della presenza in casa



Motivazioni del Controllo

- Controllo della temperatura di una stanza - 1
 - Costruzione della casa in modo da minimizzare gli effetti delle condizioni operative variabili
 - spessore delle pareti
 - rivestimento delle pareti
 - esposizione delle stanze
 - forma e dimensioni delle finestre
 - Politica di gestione
 - abbigliamento dei proprietari
 - chiusura dei vetri d'inverno
 - chiusura delle persiane durante il giorno d'estate
 - apertura delle finestre durante la notte
- Ottimizzazione dell'impianto
 - basata su un modello



Motivazioni del Controllo

- Controllo della temperatura di una stanza - 2
 - Costruzione della casa in modo da minimizzare gli effetti delle condizioni operative variabili
 - come prima +
 - predisposizione di camini e stufe
 - Politica di gestione
 - abbigliamento dei proprietari
 - gestione delle finestre d'estate
 - Azione di controllo
 - accensione dei camini e delle stufe d'inverno
 - immissione di una quantità predefinita di energia
- Controllo in catena aperta
 - basata su un modello ed una stima delle condizioni operative



Motivazioni del Controllo

- Controllo della temperatura di una stanza - 3
 - Costruzione della casa in modo da minimizzare gli effetti delle condizioni operative variabili
 - come prima, ma meno curata +
 - predisposizione di impianto di riscaldamento e condizionamento
 - Politica di gestione
 - abbigliamento dei proprietari (meno attento)
 - Azione di controllo
 - accensione dell'impianto e predisposizione della centralina
 - immissione di una quantità di energia funzione della temperatura interna ed esterna e delle specifiche
- Controllo in retroazione
 - basata su un modello, sulla misura dell'obiettivo (temperatura interna) e delle condizioni operative



Motivazioni del Controllo

- Esempio
 - Sospensione dell'automobile
 - perché controllo
 - condizioni operative variabili
 - numero di persone
 - rettilineo/curva
 - tipo di tracciato e di asfalto
 - specifiche variabili
 - corsa su pista
 - rally
 - guida in città
 - guida confortevole in autostrada



Motivazioni del Controllo

- Sospensione tradizionale (senza controllo)

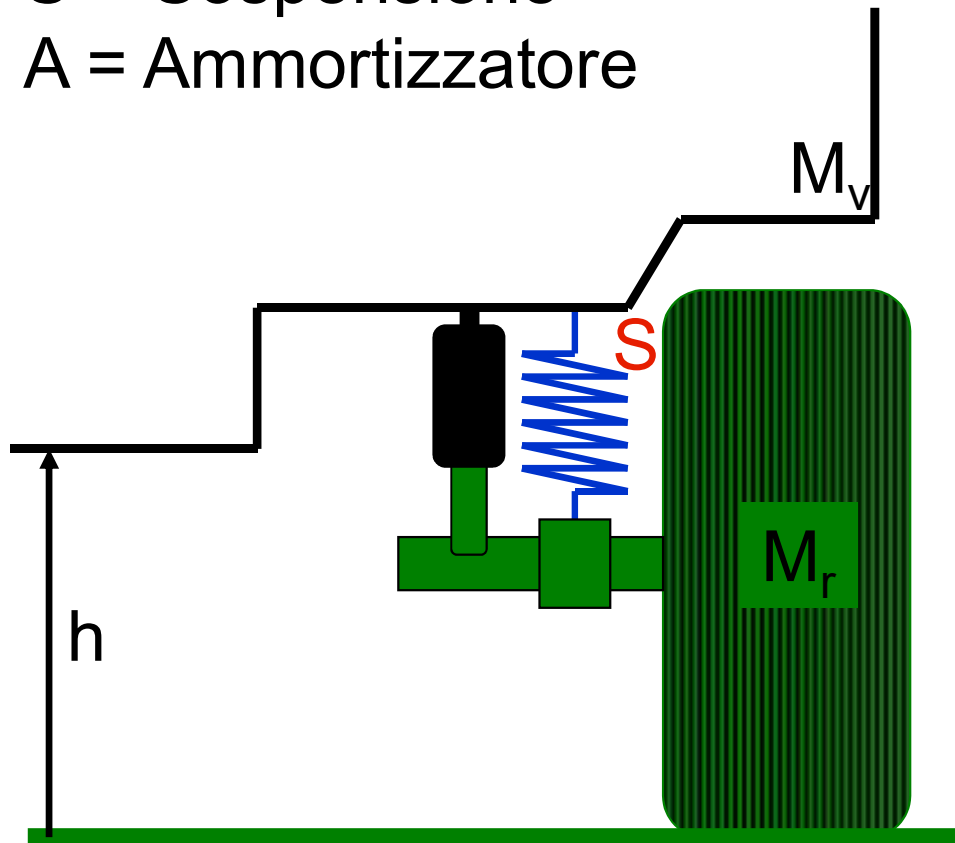
Elementi in gioco

M_v = massa del veicolo

M_r = Massa della ruota

S = Sospensione

A = Ammortizzatore



Lo scopo è garantire:

- la tenuta di strada ed il confort

⇒ h costante

mediante la scelta (taratura) di:

S ⇒ accumulatore di energia

A ⇒ dissipatore di energia

Problemi:

- specifiche in contrasto

- condizioni operative variabili
(passeggeri, tipo di strada, ..)

⇒ soluzione di compromesso

valida in condizioni nominali

Motivazioni del Controllo

- Sospensione con controllo (Sospensione attiva)

Elementi in gioco

M_v = massa del veicolo

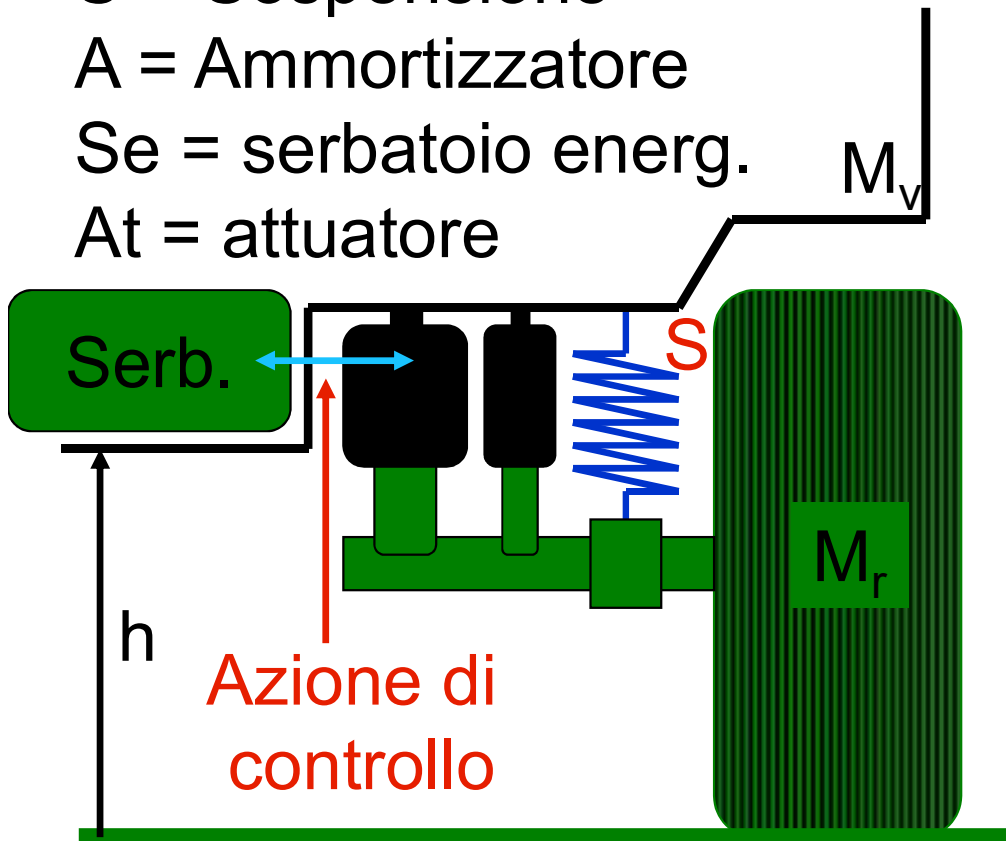
M_r = Massa della ruota

S = Sospensione

A = Ammortizzatore

Se = serbatoio energ.

At = attuatore



Lo scopo è garantire:

- la tenuta di strada ed il confort

⇒ h costante

mediante **azione intelligente e**

continua su:

At ⇒ scambiatore di energia
con **Serb.**

Vantaggi:

Cambiamento della strategia di

azione nelle diverse condizioni

⇒ soluzione ottimizzata

valida in tutte le condizioni

Svantaggi:

costi



Motivazioni del Controllo

- Alcune considerazioni
 - Gli esempi mostrano che
 - è indispensabile garantire che il sistema da controllare sia, di per sé, funzionante al meglio anche senza controllo
 - non si costruisce una Panda per correre in F1
 - il controllo deve principalmente garantire le prestazioni
 - al variare delle specifiche
 - programmazione giornaliera/settimanale
 - tipo di guida
 - al variare delle condizioni operative dell'impianto (parametri)
 - numero di persone presenti nella stanza o di passeggeri
 - al variare degli agenti esterni (disturbi)
 - temperatura esterna
 - irraggiamento
 - salita/discesa, vento, stato dell'asfalto (buche,...)
 - punto di partenza per il progetto di un sistema di controllo è la predisposizione di un **modello** dell'impianto



Progetto di un sistema di controllo - 1

- definizione delle specifiche
 - obiettivi da conseguire
 - qualità del controllo
 - costo
 -
- Modellazione del sistema
 - scelta del dettaglio
 - definizione degli ingressi
 - definizione delle uscite
 - tipologia di rappresentazione
 - "costruzione" del modello
 - validazione mediante simulazione



Progetto di un sistema di controllo - 2

- analisi del sistema
 - studio delle proprietà
 - verifica di fattibilità delle specifiche di controllo
- sintesi della legge di controllo basata sul modello
 - verifica delle proprietà del sistema controllato
 - valutazione della complessità e stima del carico computazionale
- simulazione del sistema controllato
 - condizioni ideali
 - condizioni realistiche
 - modello impianto più complesso
 - quantizzazione delle grandezze,
 - ritardi di calcolo, disturbi di misura



Progetto di un sistema di controllo - 3

- introduzione degli elementi tecnologici
 - sensori, attuatori
 - catena di acquisizione ed attuazione
 - dispositivo di elaborazione
- sperimentazione
 - prototipazione rapida
 - verifica delle specifiche
 - stima del costo
 - costruzione di un prototipo definitivo
 - ingegnerizzazione
 - produzione in serie



Obiettivi del Corso

- Approfondire gli strumenti matematici per l'analisi dei sistemi dinamici lineari, sia per il progetto dei sistemi di controllo che per la modellistica dei sistemi dinamici.
- Fornire criteri per il progetto integrato di sistemi meccanici controllati elettronicamente (meccatronica).
- Creare un linguaggio comune fra meccanica, elettronica e controlli automatici per permettere il progetto integrato di sistemi meccatronici.
- Introdurre le basi per progettare con l'ausilio del calcolatore i sistemi di controllo e per simulare il comportamento dinamico dei sistemi.

CONTROLLI AUTOMATICI (L-Z)
Ingegneria Meccanica e Ingegneria del Veicolo

<http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti/ControlliAutomatici.html>

SISTEMI DI CONTROLLO
INTRODUZIONE
FINE

Ing. Luigi Biagiotti

e-mail: luigi.biagiotti@unimore.it

<http://www.dii.unimore.it/~lbiagiotti>