

**A.A. 2025-26**

# Controlli automatici

## Introduzione al corso

**Prof. Alessandro Pisano**

`apisano@unica.it`

**Durata:** 60 ore

**Docente:** Prof. Alessandro Pisano

**Prerequisiti:** Analisi matematica 1 e 2. Equazioni differenziali.

**Obiettivi del corso:**

*Fornire le basi metodologiche per la comprensione dei **sistemi automatici di controllo***

*Illustrare diversi criteri di **analisi** e **sintesi** di sistemi di controllo e le principali **architetture di controllo impiegate nella pratica industriale***

*Testare le metodologie apprese mediante l'utilizzo dell'ambiente di **simulazione dinamica** Matlab/Simulink*

*Sperimentare alcune delle tecniche di sintesi presentate nel corso mediante setup da laboratorio*

# CONTROLLI AUTOMATICI

## PROGRAMMA DEL CORSO

### 1. Concetti introduttivi (12 h: 12DF)

Introduzione al corso. Sistemi dinamici lineari tempo invarianti (LTI). Modelli ingresso-uscita e modelli in variabili di stato. Trasformata di Laplace. Significato e parametri di una funzione di trasferimento. Algebra degli schemi a blocchi. Stabilità a ciclo aperto e a ciclo chiuso. Stabilità interna ed esterna. Criterio di Routh-Hurwitz. Parametri e andamenti tipici della risposta al gradino per sistemi LTI di ordine 1 e 2. Linearizzazione di sistemi non lineari.

### 2. Luogo delle Radici (6 h: 4DF, 2ES)

Significato e regole di tracciamento. Equazione dei punti doppi. Taratura del luogo delle radici. Esempi di tracciamento ed analisi.

### 3. Specifiche a regime e specifiche sul transitorio (8h: 6DF, 2ES)

Sistemi di controllo di tipo 0,1 e 2. Precisione a regime e reiezione dei disturbi. Principio del modello interno. Legame tra specifiche sul transitorio e posizione dei poli. Risposta armonica.

### 4. Sistemi con ritardi finiti (4h: 3DF, 1ES)

Modellazione di sistemi con ritardi finiti. Stabilità a ciclo chiuso di sistemi con ritardo (criterio di Bode). Predittore di Smith.

### 5. Sintesi dei regolatori e schemi avanzati di controllo (27h: 20DF, 7 ES)

Sintesi diretta. Sintesi mediante Luogo delle radici. Sintesi mediante regolatori PID: regole di taratura, configurazioni PI-D ed I-PD. Strutture di controllo avanzate: Schemi anti wind-up; Controllo in cascata; Controllo feed-forward; Controllo con override; Controllo di rapporto. Esempi (regolazione di caldaie, regolazione di turbine a gas, controllo della combustione, regolazione di impianti solari termodinamici). Controllo multivariabile (cenni). Implementazione digitale dei controllori. Rappresentazione di sistemi di controllo mediante diagrammi P&I (cenni).

### 6. Attività di laboratorio (3h: 3LAB)

Controllo di un motore in corrente continua mediante piattaforma Arduino.

## **Lezioni frontali teoriche**

## **Esercitazioni al calcolatore**

- Progetto e simulazione dei sistemi di controllo visti a lezione mediante **Matlab-Simulink** e mediante software per la programmazione e l'emulazione di PLC

## **Attività di Laboratorio**

- Controllo di un servomotore elettrico in corrente continua

Simulazione con verifica sperimentale mediante piattaforma Arduino

## TESTI DI RIFERIMENTO


P. Bolzern, R. Scattolini, N. Schiavoni  
Fondamenti di controlli automatici, terza edizione  
McGraw Hill, 2008.

G. Magnani, G. Ferretti, P. Rocco,  
Tecnologie dei sistemi di controllo, seconda edizione  
McGraw Hill, 2007.

Dispense e lucidi forniti dal docente

## Pagina web del corso

<http://people.unica.it/alessandropisano/> -> **Materiale Didattico**



UniCa > Ateneo > Docenti e ricercatori > Pisano Alessandro


# Alessandro Pisano

### Dipartimento di Ingegneria elettrica ed elettronica

|   |  |
|---|--|
| <b>Ruolo</b>                            | Professore ordinario   |
| <b>Area scientifico disciplinare</b>    | Ingegneria industriale e dell'informazione                   |
| <b>Settore scientifico disciplinare</b> | ING-INF/04 AUTOMATICA  |
| <b>Email</b>                            | <a href="mailto:apisano@unica.it">apisano@unica.it</a>       |
| <b>Telefono</b>                         | 070/675-5760   |
| <b>Indirizzo</b>                        | via marengo 2, 09123 Cagliari                                |
| <b>Orario di ricevimento</b>            | Tutti i giorni previo appuntamento da concordare per e-mail. |

 Curriculum

 Insegnamenti

 **Materiale didattico**

 Altre Attività

 Tesi

 Ricerca

 Avvisi

 Agenda

**click**



- Ateneo
- Futuri studenti
- Studenti
- Laureati
- Ricerca
- Società e territorio



UniCa > Ateneo > Docenti e ricercatori > Alessandro Pisano > Materiale didattico

## Alessandro Pisano

Q Filtra risultati

### Controlli Automatici A.A. 2025-2026

Data: 01 ottobre 2025

Controlli Automatici - materiale didattico e informazioni - A.A. 2025-2026

### Controllo dei Sistemi Energetici (CSE) - AA 2024-25

Data: 11 marzo 2025

Home page del corso di "Controllo dei sistemi energetici" .A.A 2024-25

### Controlli Automatici A.A. 2024-2025

Data: 13 novembre 2024

Controlli Automatici - materiale didattico e informazioni - A.A. 2024-2025

- Curriculum
- Insegnamenti
- Materiale didattico**
- Altre Attività
- Tesi
- Ricerca
- Avvisi
- Agenda

Nella pagina «Controlli Automatici AA 2025-2026» è reso disponibile tutto il materiale didattico

**Importante:** inviatemi una email all'indirizzo [apisano@unica.it](mailto:apisano@unica.it) precisando il vostro nome e cognome, corso di studi e numero di matricola, e inserendo come oggetto:

**«mailing list controlli automatici».**

## MODALITA' DI ESAME

**Colloquio orale**

**Svolgimento elaborato/tesina** (*solo per chi abbia preventivamente sostenuto un laboratorio inerente la simulazione dinamica in ambiente Matlab-Simulink*)

**Prova intermedia scritta e prova finale scritta**

## Svolgimento elaborato/tesina

### ESTRATTO DALLA SCHEDA INSEGNAMENTO («VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO»)

Per quanto concerne la preparazione di un elaborato (tesina), il relativo svolgimento prevede che un problema di controllo concreto proposto dallo studente venga analizzato e risolto nella sua interezza (a partire dalla modellazione matematica del processo da controllare, quindi la redazione di adeguate specifiche, il progetto di controllori impiegando almeno due diverse metodologie viste nel corso, la relativa simulazione dinamica degli schemi con il software Matlab-Simulink e l'esecuzione di un confronto prestazionale ragionato, comprendente anche l'inclusione di effetti di non idealità quali ad esempio, il rumore di misura, o la dinamica dei sensori e degli attuatori). Il tema specifico e gli obiettivi della tesina vengono discussi e concordati con il docente prima dell'inizio del lavoro, e il docente fornisce spunti e indicazioni su aspetti specifici da trattare. La tesina viene predisposta in forma testuale (mediante Microsoft Word, o applicazione equivalente) ed ha come allegati i files Matlab-Simulink realizzati, e viene esposta al docente durante un colloquio orale, nel quale lo studente è chiamato ad esporre una presentazione Powerpoint (o redatta con applicazione equivalente) durante la quale riassume i contenuti del lavoro svolto ed i risultati ottenuti, e chiarisce dubbi formulati dal docente. Durante lo svolgimento del lavoro, lo studente ha facoltà di interagire due volte con il docente per esporre eventuali problemi incontrati e ricevere ragguagli su come procedere. Tale strutturazione consente la verifica della effettiva acquisizione dei risultati di apprendimento attesi.

All'elaborato viene attribuito un voto fino a 20 punti, correlato alla correttezza, completezza ed al livello di approfondimento del lavoro svolto ed alla autonomia dimostrata nel suo svolgimento, mentre alla presentazione finale viene attribuito un voto fino a 10 punti correlato alla efficacia della stessa. Il voto finale è la somma fra i voti ottenuti per l'elaborato e per la presentazione finale.

## LINEE GUIDA PIU ESTESE PER LA REALIZZAZIONE DELLA TESINA

Circa l'elaborato, in esso si dovrà mostrare di aver compreso e di saper applicare le metodologie di analisi e progetto viste a lezione con riferimento ad un problema di controllo reale, abbinando opportune considerazioni critiche ai risultati ottenuti e presentando alcuni risultati simulativi ottenuti mediante Matlab-Simulink.

Non vi è una struttura fissa e inamovibile per l'elaborato. Circa il tema questo dovrà essere individuato e proposto dallo studente. E' infatti parte dello svolgimento dell'elaborato l'individuazione di un problema concreto di controllo con riferimento al quale svilupparlo.

Mi va bene che si reperisca in rete, o attingendo ai contenuti di altri corsi, un processo di qualunque natura (meccanico, elettrico, termico, idraulico, chimico,...), con il relativo modello matematico, per il quale abbia senso la realizzazione di un sistema di controllo in retroazione. E' possibile trovare, ad esempio, vari spunti nelle demo di Simulink relative ai sistemi di controllo.

Un tema visto a lezione che potrebbe essere oggetto di una tesina è la regolazione a 3 elementi del livello nel corpo cilindrico di una caldaia.

Per chi fosse interessato, faremo un primo incontro, in cui mi proporrete un tema, lo discuteremo, e vi fornirò input in merito a come affrontarlo o renderlo maggiormente aderente alla pratica. Poi potremo fare uno o due ulteriori incontri in cui mi esporrete eventuali problemi incontrati in itinere e vi fornirò raggugli su come procedere, ed in ultimo ci sarà la discussione finale in esito alla quale vi attribuirò il voto.

Il voto discenderà sia dalla completezza dell'elaborato e dalla assenza di gravi errori concettuali nei procedimenti sviluppati che da come discuterete criticamente sia nell'elaborato che nel colloquio di presentazione dei risultati le procedure adottate ed i risultati ottenuti.

Mi aspetto che una volta avviato il lavoro questo venga concluso e consegnato in un mese/un mese e mezzo circa.

## LINEE GUIDA PIU ESTESE PER LA REALIZZAZIONE DELLA TESINA (2)

Possibili contenuti della tesina:

Modello matematico del sistema (lineare, o eventualmente da linearizzare. Se reperite un modello matematico non lineare vi fornirò precisi ragguagli sul come ricavarne un modello linearizzato intorno ad un punto di lavoro), classificazione dei segnali coinvolti (ingresso, uscita, disturbi) e descrizione del problema di controllo.

Analisi del sistema a ciclo aperto (eventuale rimozione di poli o zeri trascurabili)

Progetto di un sistema di controllo attraverso la sintesi mediante luogo delle radici

Progetto di un sistema di controllo attraverso la sintesi diretta

Progetto di un sistema di controllo attraverso regolatori PID

Studio e implementazione di una o più architettura avanzate:

- controllo in cascata

- schemi PI-D ed I-PD

- schemi anti wind-up

- controllo feedforward

- predittore di smith

- controllo over-ride

Simulazioni:

Inseguimento di set point costanti o variabili.

Reiezione/attenuazione di disturbi

Effetti del rumore di misura

Effetti di incertezze sui parametri (il progetto del controllore viene sviluppato assumendo che uno o più parametri assumano un certo valore nominale, ma in realtà il valore "vero" dei parametri differisce da quello nominale per un 10%, 20%, ecc)

Implementazione digitale del controllore

## LINEE GUIDA PIU ESTESE PER LA REALIZZAZIONE DELLA TESINA (3)

In funzione del particolare problema affrontato tratterete alcuni fra i punti della lista, e non altri. Desidero che il sistema di controllo sia progettato impiegando almeno due approcci distinti.

La lista è inoltre non esaustiva, nel senso che potete sviluppare anche analisi di tipo differente (ad esempio, un confronto fra i risultati ottenuti utilizzando diversi valori della saturazione dell'attuatore, ).

Qualunque sia il problema trattato, mi aspetto che prestate una grande attenzione al fatto che le risposte ottenute siano realistiche, sia in merito al comportamento dell'uscita che dell'ingresso. Ad esempio, un sistema di controllo della temperatura di un forno che la regoli in un millesimo di secondo con un ingresso che raggiunge picchi di milioni di watt non è realistica.

Altre domande di carattere generale ?

## Controlli automatici

L'**automatica** è la disciplina per mezzo della quale si analizzano, progettano e realizzano i **sistemi di controllo automatico**.

I sistemi di controllo servono a fare in modo che un determinato «**sistema**» (un dispositivo, un processo industriale più o meno complesso,...) **si comporti (evolva nel tempo) secondo modalità di funzionamento «desiderate»**.

Ciò avviene attraverso una integrazione sinergica fra apparati elettronici, informatici e di comunicazione/acquisizione dati (sensori di misura, microprocessori, PLC,...) che «corredano» il sistema fisico da controllare.

**I sistemi di controllo permeano la realtà che ci circonda**

# I sistemi di controllo sono ovunque

<http://ieeecss.org/control-systems-are-ubiquitous>  
<http://ieeecss.org/impact-control-technology-2nd-edition>



Process control

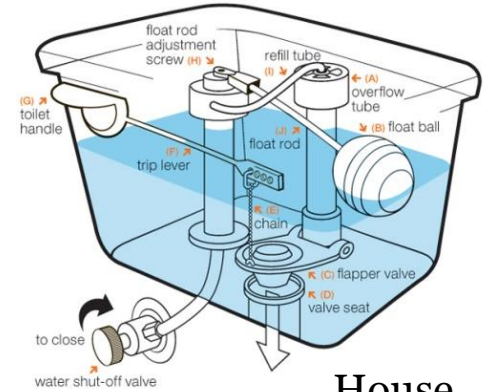


Noise canceling headphones

HDD



Aerospace



House



Mobility



Production lines



Automotive

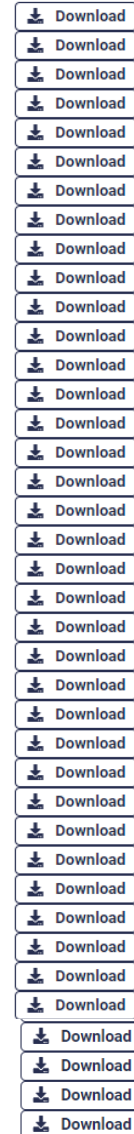
## Part 1: Success Stories for Control

- Download [Compilation of Success Stories](#) (application/pdf)
- [Auto-tuners for PID Controllers](#) (application/pdf) ?
- [Control in Mobile Phones](#) (application/pdf) ?
- [Nonlinear Multivariable Flight Control](#) (application/pdf) ?
- [Advanced Control of Pharmaceutical Crystallization](#) (application/pdf) ?
- [Autopilot for Small Unmanned Aerial Vehicles](#) (application/pdf) ?
- [Controlling Energy Capture from Wind](#) (application/pdf) ?
- [Mobile-Robot-Enabled Smart Warehouses](#) (application/pdf) ?
- [Trip Optimizer for Railroads](#) (application/pdf) ?
- [Control in Stroke Rehabilitation](#) (application/pdf) ?
- [Advanced Control for the Cement Industry](#) (application/pdf) ?
- [Dynamics and Control for Deep-Sea Marine Risers](#) (application/pdf) ?
- [Active Safety Control for Automobiles](#) (application/pdf) ?
- [Advanced Energy Solutions for Power Plants](#) (application/pdf) ?
- [Optimal Ship-Unloading Solutions](#) (application/pdf) ?
- [Automotive Engine-Based Traction Control](#) (application/pdf) ?
- [Automated Manual Transmissions](#) (application/pdf) ?
- [Ethylene Plantwide Control and Optimization](#) (application/pdf) ?
- [Digital Printing Control: Print Shop in a Box](#) (application/pdf) ?
- [Verification of Control System Software](#) (application/pdf) ?
- [Coordinated Ramp Metering for Freeways](#) (application/pdf) ?
- [Advanced Zinc Coating Control in Galvanizing Lines](#) (application/pdf) ?
- [Digital Fly-by-Wire Technology](#) (application/pdf) ?
- [H-infinity Control for European Telecommunication Satellites](#) (application/pdf) ?
- [Road Grade Estimation for Advanced Driver Assistance Systems](#) (application/pdf) ?
- [Controller Performance Monitoring](#) (application/pdf) ?
- [Control for Formula One!](#) (application/pdf) ?
- [Advanced Control Design for Automotive Powertrains](#) (application/pdf) ?
- [Control of NASA's Space Launch System](#) (application/pdf) ?
- [Robust Adaptive Control for the Joint Direct Attack Munition](#) (application/pdf) ?
- [Improved Audio Reproduction with Control Theory](#) (application/pdf) ?



## Part 2: Challenges for Control Research

- Download Compilation of Research Challenges (application/pdf) ?
- Avoiding Pilot-Induced Oscillations in Energy-Efficient Aircraft Designs (application/pdf) ?
- Resilient Cyberphysical Systems (application/pdf) ?
- Thermal Control of Manycore and Multicore Processors (application/pdf) ?
- Controlling Modern Radars (application/pdf) ?
- Discrete-Event Control Theory for Flexible Manufacturing (application/pdf) ?
- City Labs for Intelligent Road Transportation Systems (application/pdf) ?
- Control-Theoretic Approaches in Neuroscience and Brain Medicine (application/pdf) ?
- Distributed Control for Turbine Propulsion (application/pdf) ?
- Batch Control and Trajectory Optimization in Fuel Ethanol Production (application/pdf) ?
- Actuated Wingsuit for Controlled, Self-Propelled Flight (application/pdf) ?
- Control Engineering for Cancer Therapy (application/pdf) ?
- Control of Flapping-Wing Micro Air Vehicles (application/pdf) ?
- Biological Oscillators (application/pdf) ?
- Dynamics and Control for the Artificial Pancreas (application/pdf) ?
- Human Interactions With Complex Networks (application/pdf) ?
- Control for Floating Structures in Offshore Engineering (application/pdf) ?
- Vehicle-to-Vehicle/Vehicle-to-Infrastructure Control (application/pdf) ?
- Control Challenges in Mobile Telecommunications (application/pdf) ?
- Control of Powered Prosthetic Legs (application/pdf) ?
- Management of Complex Water Networks (application/pdf) ?
- Control for Grid Responsiveness (application/pdf) ?
- Addressing Automotive Industry Needs with Model Predictive Control (application/pdf) ?
- Design Science for Cyberphysical Systems (application/pdf) ?
- Control of Integrated Gasification Combined Cycle Power Plants with CO<sub>2</sub> Capture (application/pdf) ?
- Geoengineering the Earth's Climate: The World's Largest Control Problem (application/pdf) ?
- Process Manufacturing Networks (application/pdf) ?
- MEMS-Based Nanopositioning for On-Chip Atomic Force Microscopy (application/pdf) ?
- Toward Verifiably Correct Control Implementations (application/pdf) ?
- Preserving Privacy in Cyberphysical Systems (application/pdf) ?
- Opportunities for Control Theory in Stock Trading Research (application/pdf) ?
- Preview Control of Wind Turbines (application/pdf) ?
- Supply Chain as a Control Problem (application/pdf) ?
- Control for Energy-Efficient Buildings (application/pdf) ?
- Stair-Climbing Assistive Robots (application/pdf) ?
- Lithium-Ion Battery Management (application/pdf) ?
- Estimating Heavy-Tailed Distributions in Finance (application/pdf) ?
- Modeling Cancer Dynamics and Tumor Heterogeneity (application/pdf) ?
- Control of Tokamak Plasmas (application/pdf) ?



# Challenges

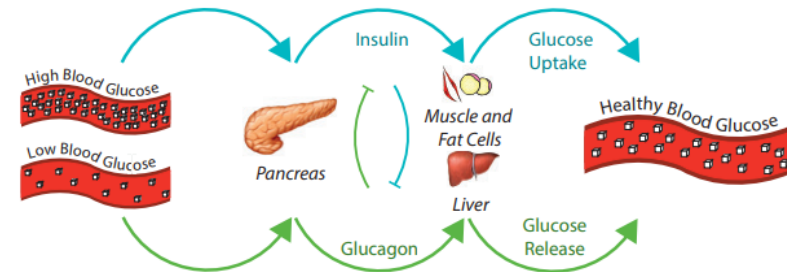
FOR CONTROL RESEARCH



## Dynamics and Control for the Artificial Pancreas

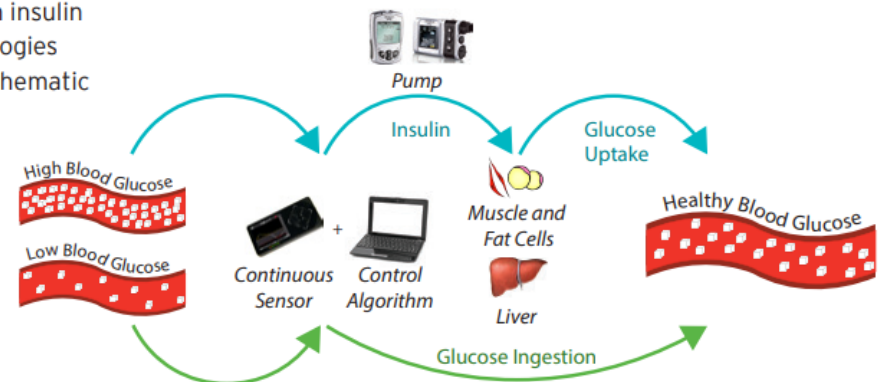
### Type 1 Diabetes

- Type 1 diabetes is an autoimmune disease leading to insufficient or no production of insulin by the pancreas. When untreated, the disease results in very high blood glucose levels.
- Current insulin therapies require frequent user intervention (insulin administration and blood glucose measurements). These typically open-loop methods are often ineffective in maintaining blood glucose in the normal range, resulting in large fluctuations in glucose.



### The Artificial Pancreas Vision

Although type 1 diabetes is currently incurable, the development of a reliable artificial pancreas would considerably improve the lifestyle of subjects with this disease. In addition to control algorithms, an automated, fully closed-loop artificial pancreas will require sensors and actuators (see below). Recent developments in continuous blood glucose monitoring (sampling rates of approximately 1–5/min) and innovations in insulin pumps (including telemetry) are promising in this context—the enabling technologies for control engineering to make an impact are well along in development (see schematic below with devices integrated into the system).



# La quasi totalità dei sistemi e processi energetici e dei dispositivi meccanici sono controllati elettronicamente (impianti per la produzione di energia, scambiatori di calore, robot, impianti chimici, 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
- ...



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

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



## Sospensioni passive e attive

- Sospensione tradizionale (senza controllo)

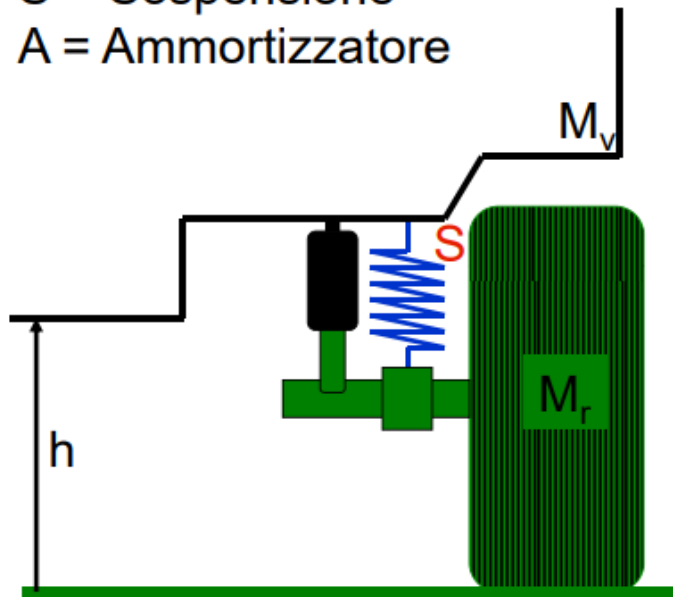
### Elementi in gioco

$M_v$  = 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  
(forza posizionale)

A ⇒ dissipatore di energia  
(forza dinamica)

Problemi:

- specifiche in contrasto

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

⇒ soluzione di compromesso  
valida in condizioni nominali 🧠

## Sospensioni passive e attive

- Sospensione con controllo (Sospensione attiva)

### Elementi in gioco

$M_v$  = massa del veicolo

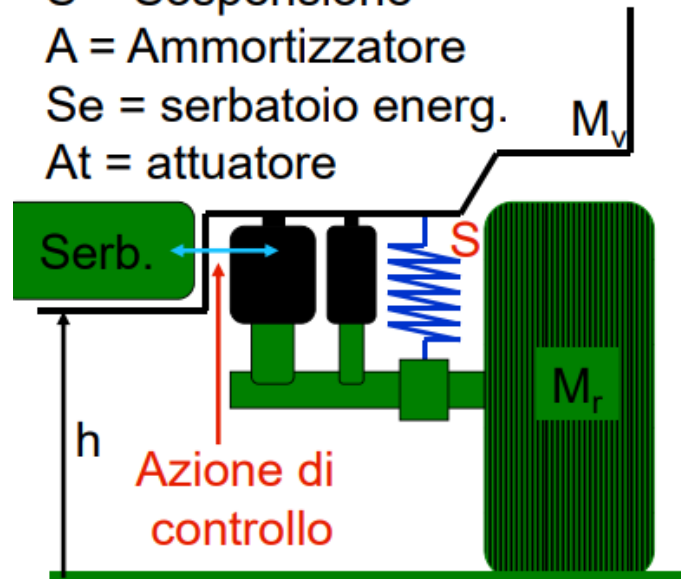
$M_r$  = Massa della ruota

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:**

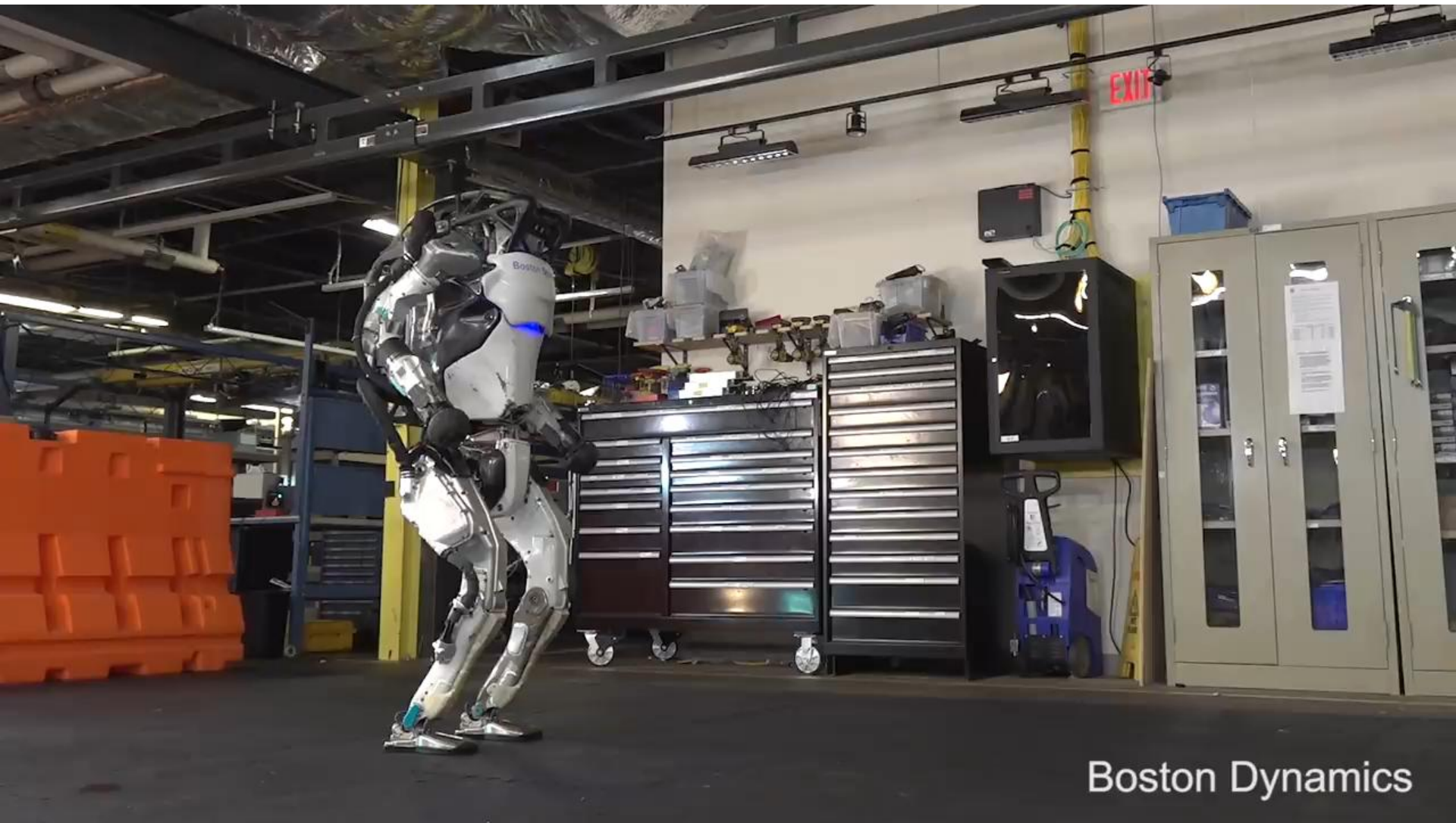
costi

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



© AIRBUS S.A.S. 2008 - photo by via company / R. COUSIN





Boston Dynamics

**Il punto di partenza per poter realizzare un sistema di controllo è comprendere e descrivere matematicamente il funzionamento del processo da controllare**

**Modellistica** : la disciplina per mezzo della quale si ricavano opportune relazioni matematiche che rappresentano il funzionamento di fenomeni fisici

**Equazioni differenziali** (ordinarie o alle derivate parziali)

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + kx = F(t)$$

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2}$$

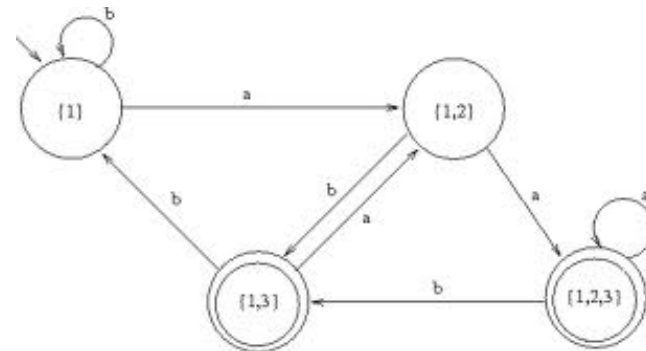
$$Q_x(0,t) = w(t) \quad Q_x(L,t) = 0$$

**Equazioni alle differenze**

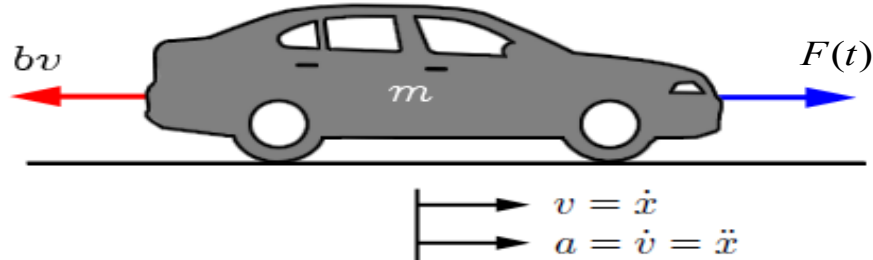
$$y(k) = y(k-1) + y(k-2) + u(k)$$

$$y(k) = y(kT_c) \quad k = 0,1,2,\dots$$

**Modelli discreti “a eventi” (automi)**



## Modello matematico della dinamica longitudinale di un veicolo



Il veicolo, di massa  $m$ , è attuato dalla spinta  $F(t)$ .  $F(t)$  rappresenta la forza applicata al veicolo nell'interfaccia tra il pneumatico e la carreggiata.  $b$  è il coefficiente di attrito.

**Ipotesi di lavoro**

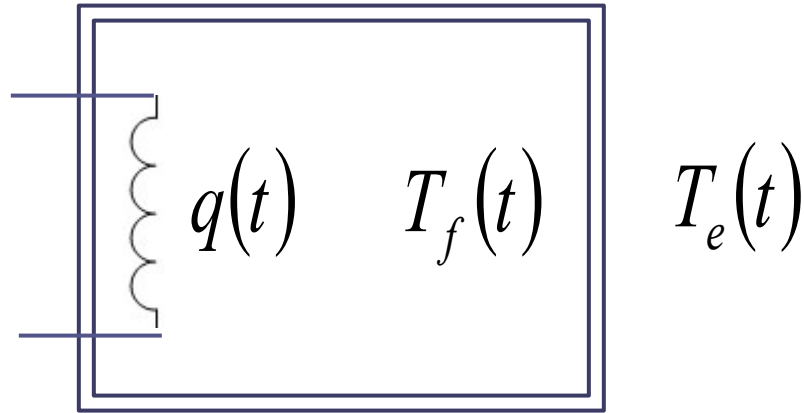
Forze di attrito di natura puramente viscosa

**Equazione differenziale  
(leggi della dinamica)**

$$m\dot{v}(t) + bv(t) = F(t)$$

## Modello matematico di un processo termico

Consideriamo un **sistema termico** rappresentato da un volume  $V$  circondato da una parete e contenente un **fluido** ed un elemento riscaldante (ad es. una resistenza elettrica) in grado di trasferire calore all'interno del volume



Sia  $T_e(t)$  [ $^{\circ}K$ ] la temperatura esterna,  $T_f(t)$  [ $^{\circ}K$ ] la temperatura del fluido interno al volume, e  $q(t)$  [ $J/s$ ] una sorgente di calore interna al volume.

Sia  $C_f$  [ $J/K$ ] la capacità termica del fluido, e sia  $K_{ie}$  [ $J/Ks$ ] il coefficiente di scambio termico tra interno ed esterno.

**Equazione differenziale  
(leggi che governano  
l'accumulo ed il  
trasferimento del calore)**

$$C_f \dot{T}_f(t) = q(t) + K_{ie} [T_e(t) - T_f(t)]$$



$$C_f \dot{T}_f(t) + K_{ie} T_f(t) = q(t) + K_{ie} T_e(t)$$

## ELEMENTI CARATTERISTICI DI UN SISTEMA DINAMICO

Quali sono le grandezze esterne modificabili a nostro piacimento (manipolabili) attraverso le quali possiamo influenzare il comportamento del sistema/processo ?

INGRESSI

Quali sono le grandezze delle quali ci interessa imporre il comportamento ?

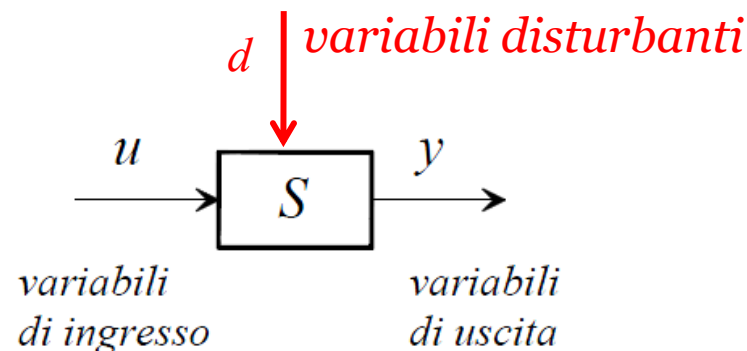
USCITE

Esistono grandezze che influenzano il comportamento del sistema/processo ma che non sono manipolabili a nostro piacimento?

DISTURBI

Quali relazioni matematiche intercorrono fra le grandezze di ingresso, le grandezze disturbanti e le grandezze di uscita ?

MODELLO MATEMATICO DEL SISTEMA



## Classifichiamo i segnali che compaiono nei due modelli matematici appena visti

$$m\dot{v}(t) + bv(t) = F(t) \quad \text{Ingresso?} \quad \text{Uscita?} \quad \text{Disturbo?}$$

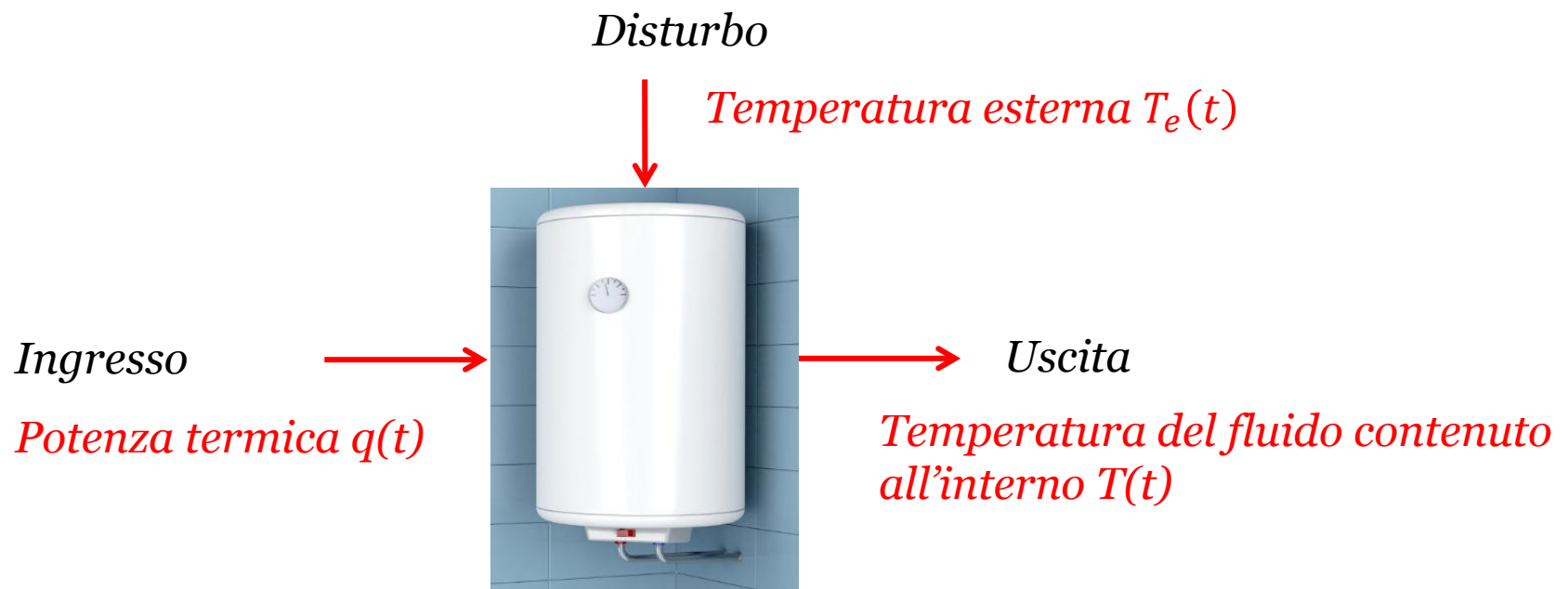
Il modello del veicolo contiene un segnale di **ingresso** (la spinta applicata  $F(t)$ ) ed un segnale di **uscita** (la velocità longitudinale  $v(t)$  del veicolo)

$$C_f \dot{T}_f(t) + K_{ie} T_f(t) = q(t) + K_{ie} T_e(t) \quad \text{Ingresso?} \quad \text{Uscita?} \quad \text{Disturbo?}$$

Il modello del sistema termico contiene un segnale di **ingresso** (la potenza applicata  $q(t)$ ), un segnale di **uscita** (la temperatura  $T_f(t)$  del fluido) ma anche un **disturbo** (la temperatura ambiente  $T_e(t)$ )

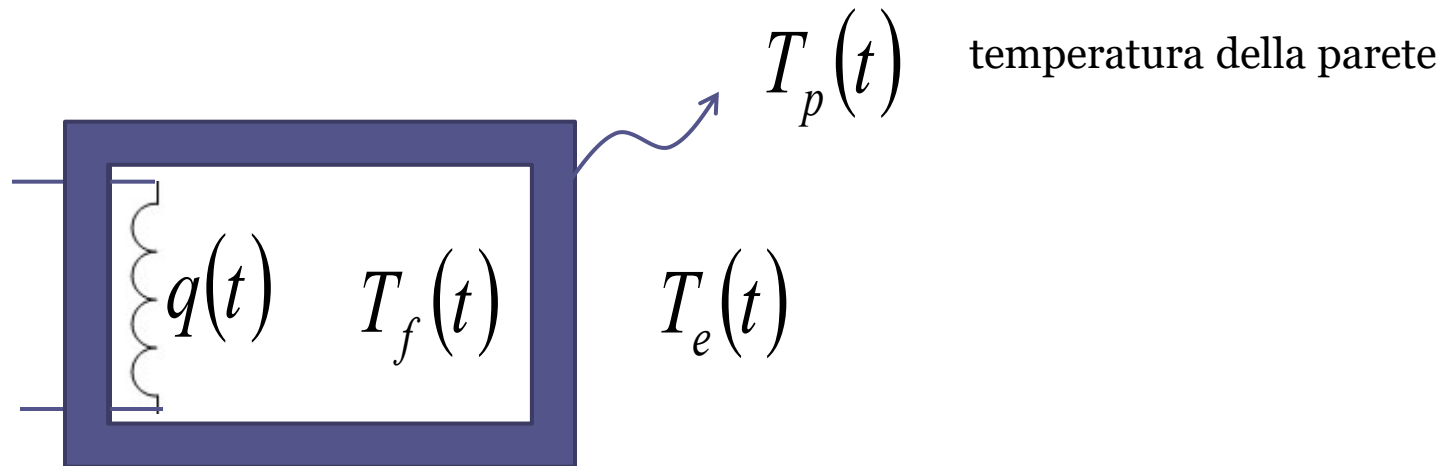
Vi sono similarità fra i modelli matematici del veicolo e del sistema termico ?

## Schemi a blocchi



## Complichiamo il modello del sistema termico (boiler/forno)

Trattiamo in maniera distinta gli accumuli termici nel volume e nella parete di contorno. Definiamo quindi un modello più complesso che descriva anche l'evoluzione temporale della temperatura della parete  $T_p(t)$ .



$C_f$  [J/K] è la capacità termica del gas interno al volume

$C_p$  [J/K] è la capacità termica del materiale che costituisce la parete

$K_{ip}$  [J/K s] è il coefficiente di scambio termico tra l'interno del volume e la parete.

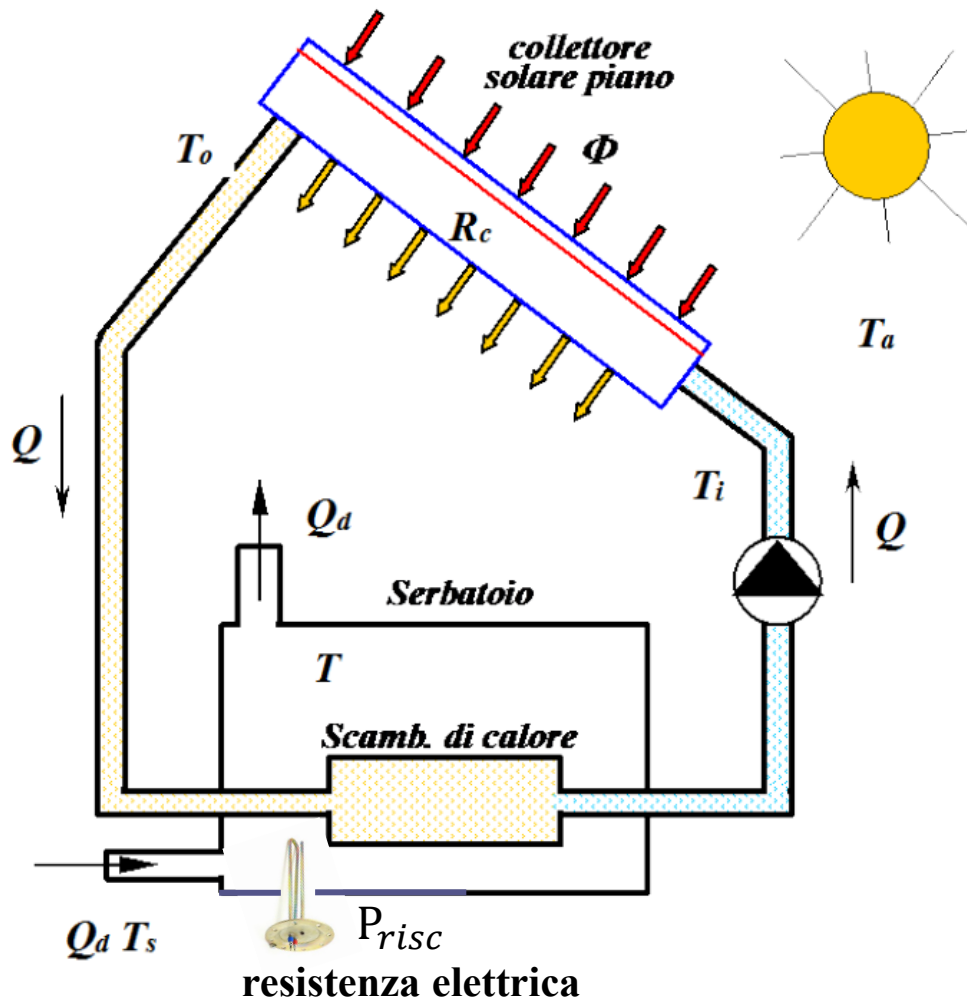
$K_{pe}$  [J/K s] è il coefficiente di scambio termico tra la parete e l'esterno.

Modello matematico (LTI)

$$C_f \dot{T}_f(t) = q(t) + K_{ip} (T_p(t) - T_f(t))$$

$$C_p \dot{T}_p(t) = K_{pe} (T_e(t) - T_p(t)) - K_{ip} (T_p(t) - T_f(t))$$

## Un sistema termico più complesso: collettore solare piano accoppiato ad un serbatoio di ACS



Si consideri il sistema in figura che utilizza un collettore solare piano per il riscaldamento dell'acqua.

L'impianto si compone sostanzialmente di tre elementi: il serbatoio, il collettore solare, e lo scambiatore di calore

Si considera inoltre un riscaldatore elettrico che possa sopperire alla carenza di una sufficiente radiazione solare

$Q, Q_d$  portate volumetriche

$\Phi$  radiazione solare

## Modello dinamico

Dedotto applicando il PCE e le leggi che governano i fenomeni di scambio termico nei dispositivi in gioco

$$c_w \rho_w V \frac{dT(t)}{dt} = -c_w \rho_w Q_d (T - T_s) + c_p \rho_p Q \varepsilon (T_o - T) + P_{risc}$$

$$T_o = f_0(T, \Phi, T_a, Q; \varepsilon)$$

$$f_0(T, \Phi, T_a, Q; \varepsilon) = \frac{A_c F_R \Phi + T \varepsilon [c_p \rho_p Q - A_c F_R U_L] + A_c F_R U_L T_a}{c_p \rho_p Q \varepsilon + A_c F_R U_L (1 - \varepsilon)} =$$

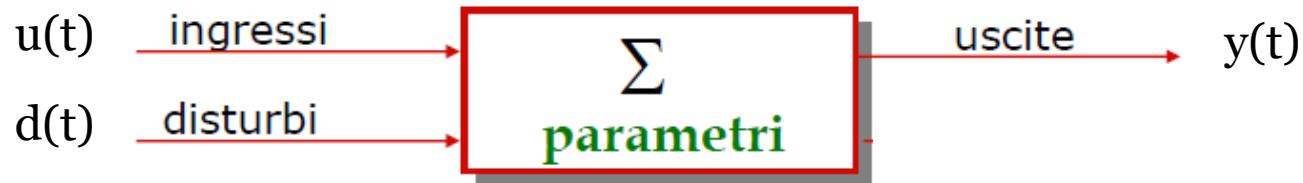
Per limitare la complessità del modello, i fenomeni di scambio termico associati al sistema collettore solare ed al sistema scambiatore di calore sono considerati **istantanei**, e si caratterizza dinamicamente in termini di equazione differenziale unicamente l'accumulo termico nel serbatoio, che opera su una scala temporale molto più lenta e rappresenta la cosiddetta «**dinamica dominante**» del processo

## Sistemi dinamici

Si dicono **SISO** (Single Input Single Output) i sistemi con ingresso e uscita scalare, genericamente **MIMO** (Multiple Input Multiple Output) gli altri.

Si dicono **lineari tempo-invarianti (LTI)** i sistemi descritti da equazioni differenziali lineari a coefficienti costanti.

## ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN SISTEMA DA CONTROLLARE



**Ingressi:** li possiamo imporre (es. posizione acceleratore, tensione su un motore elettrico, angolo del timone)

**Disturbi:** agiscono indipendentemente (es. vento, coppia resistente, corrente in mare) (non manipolabili, talvolta misurabili)

**Uscite:** ciò che ci interessa (es. velocità, angolo asse del motore, angolo di rotta)

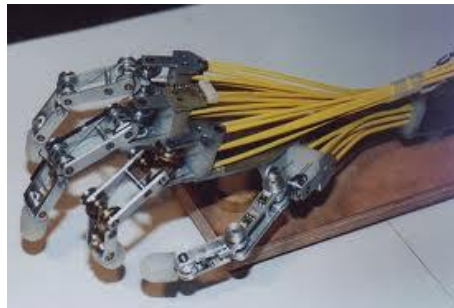
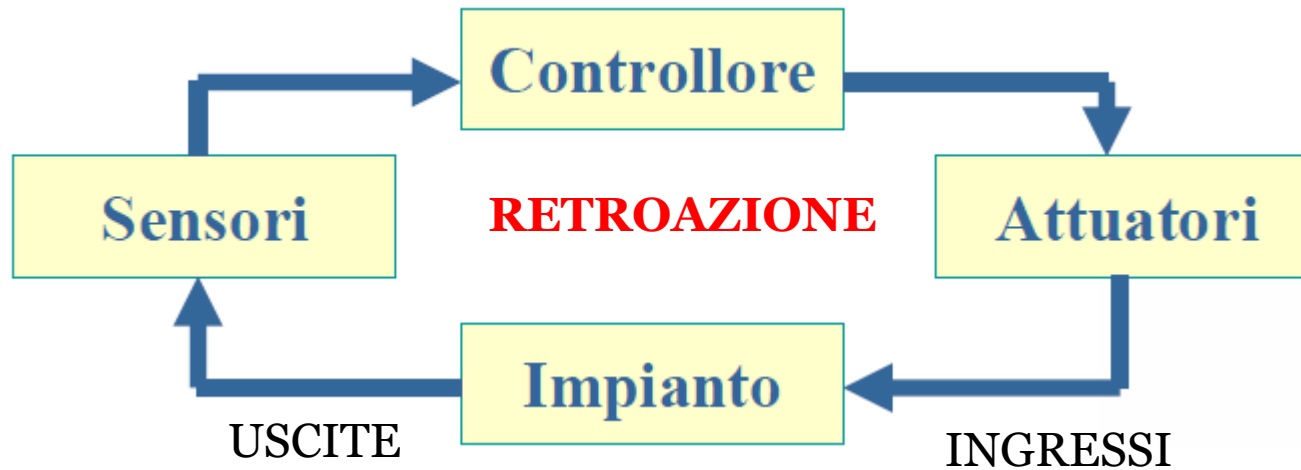
**Parametri:** le "costanti" che appaiono nel modello del sistema (es. la massa, gli attriti, l'elasticità)

## COMPORTAMENTO DESIDERATO

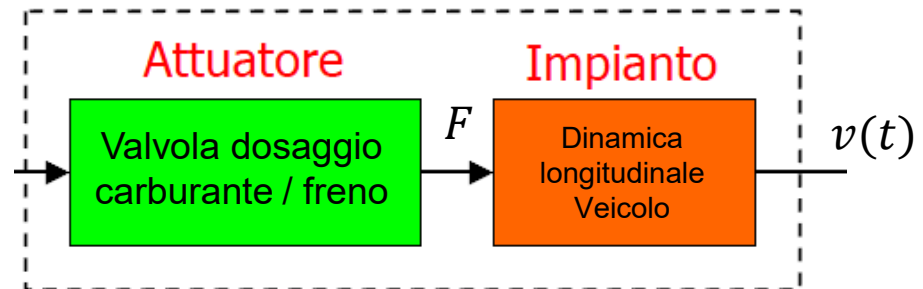
$y(t) \longrightarrow r(t)$  (  $r = \text{riferimento} = \text{set-point} = \text{uscita «desiderata»}$  )

## Il ruolo dei **sistemi di controllo automatico**

Un sistema di controllo automatico deve garantire il corretto funzionamento del “sistema” in tutte le condizioni operative previste

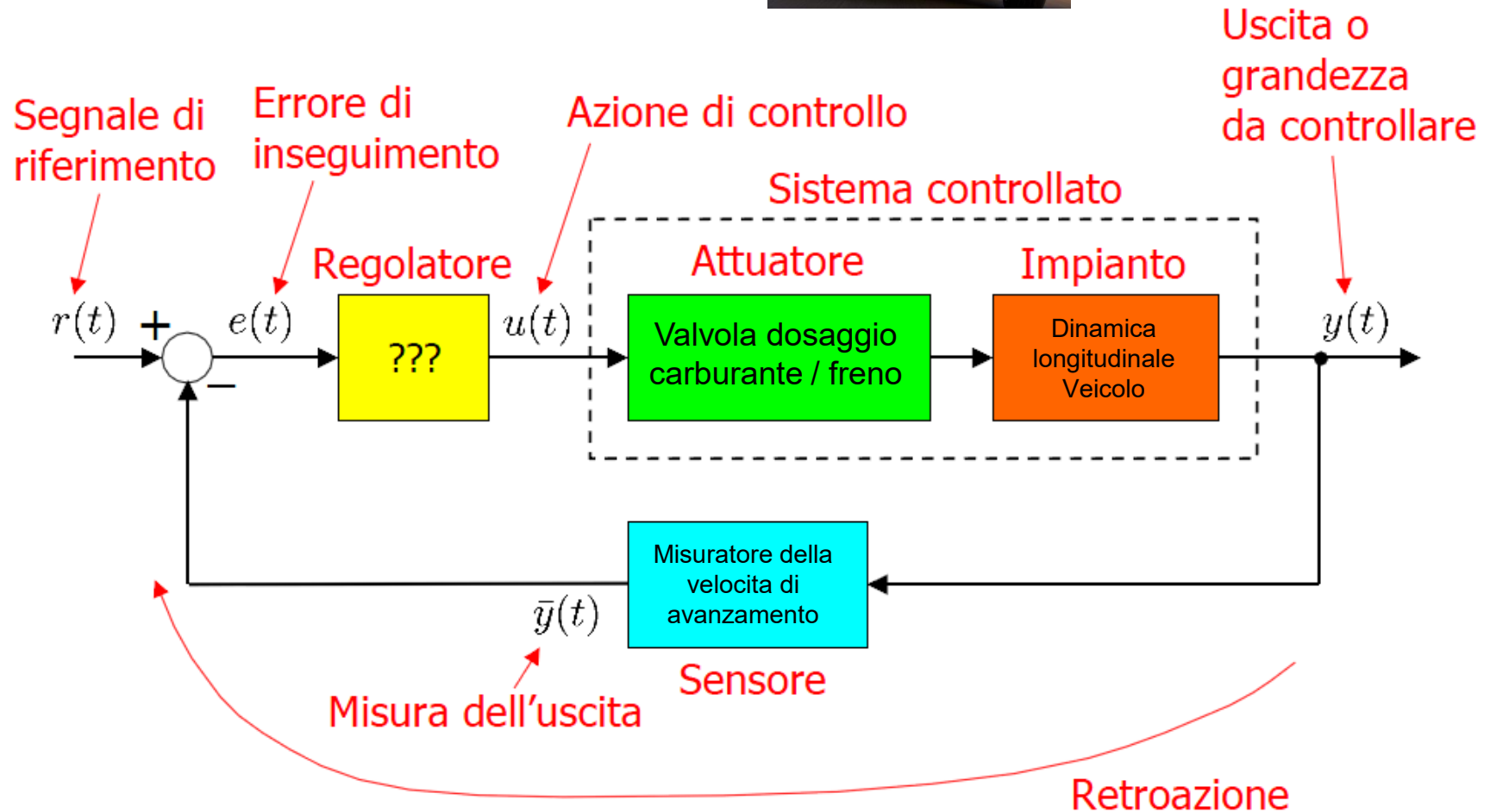


*Regolazione della velocità longitudinale  
di un veicolo (cruise control)*



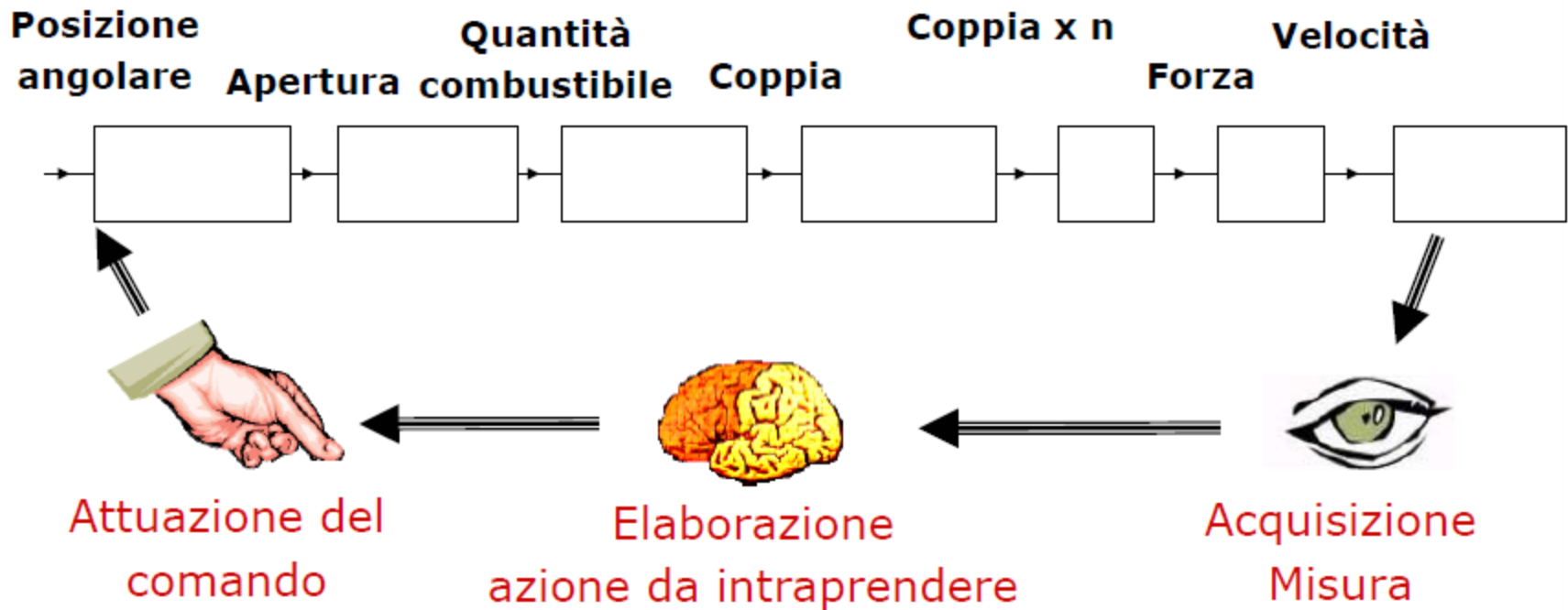
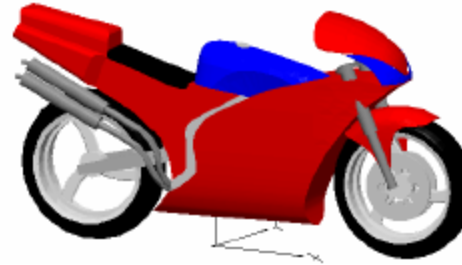
## Sistema di controllo in **Retroazione**

*Regolazione della velocità longitudinale di un veicolo (cruise control)*

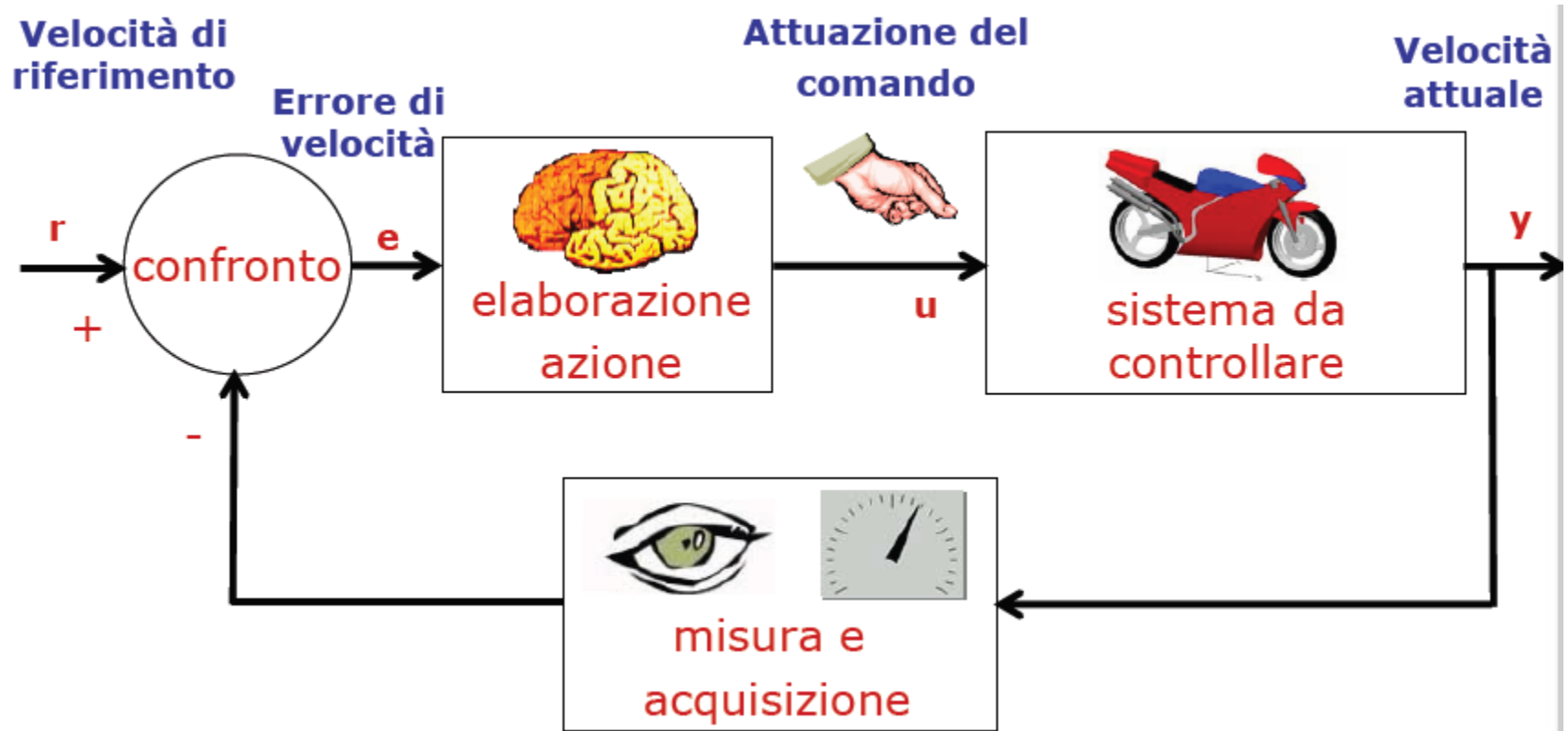




# Guida di un motociclo



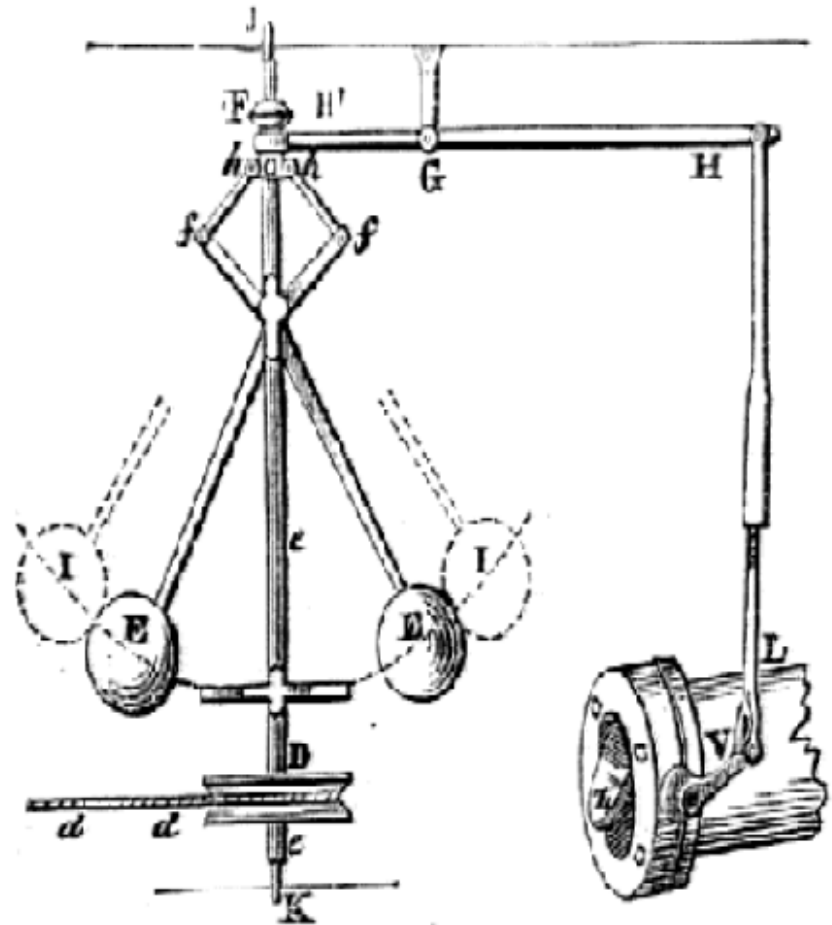
## Schema in retroazione



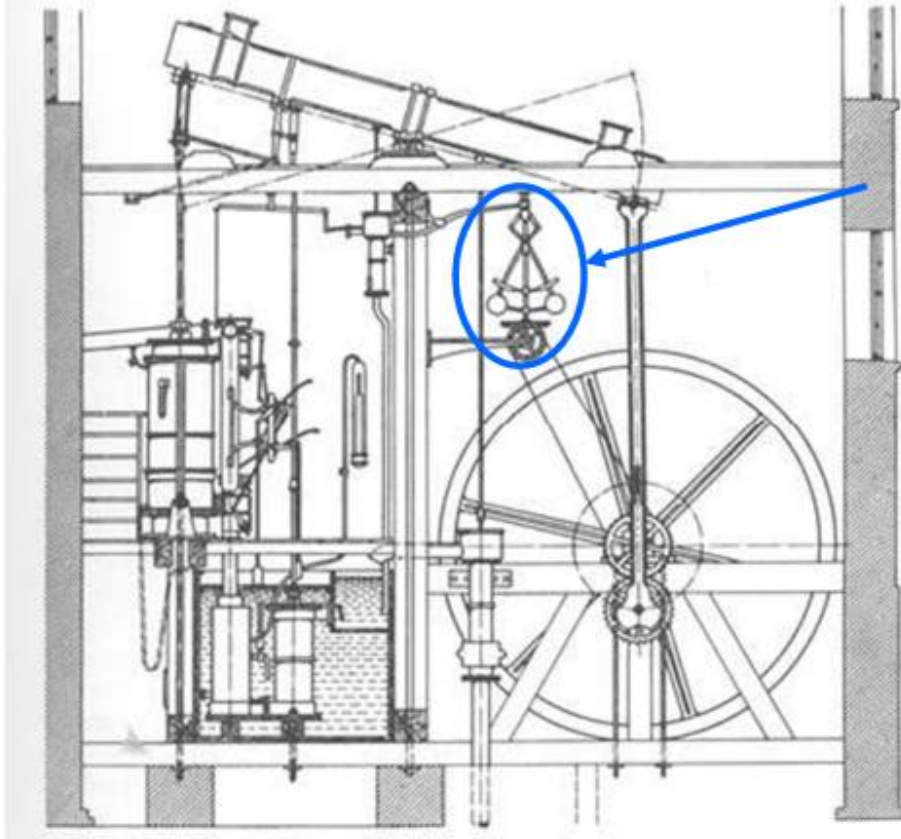
## Un pò di storia: il Regolatore di Watt

Governor (1788)

L'applicazione di questo congegno alla **macchina a vapore** riveste una grande importanza nella storia della tecnica perchè esso fu il capostipite di una numerosissima famiglia di apparecchi automatici di controllo, tutti indispensabili per il corretto funzionamento degli impianti. Questo "governor" faceva accelerare la macchina se rallentava per il troppo carico o la faceva rallentare dopo una accelerazione dovuta a diminuzione di carico



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



**Controllo automatico  
della velocità**

**più** veloce gira  
l'asse,

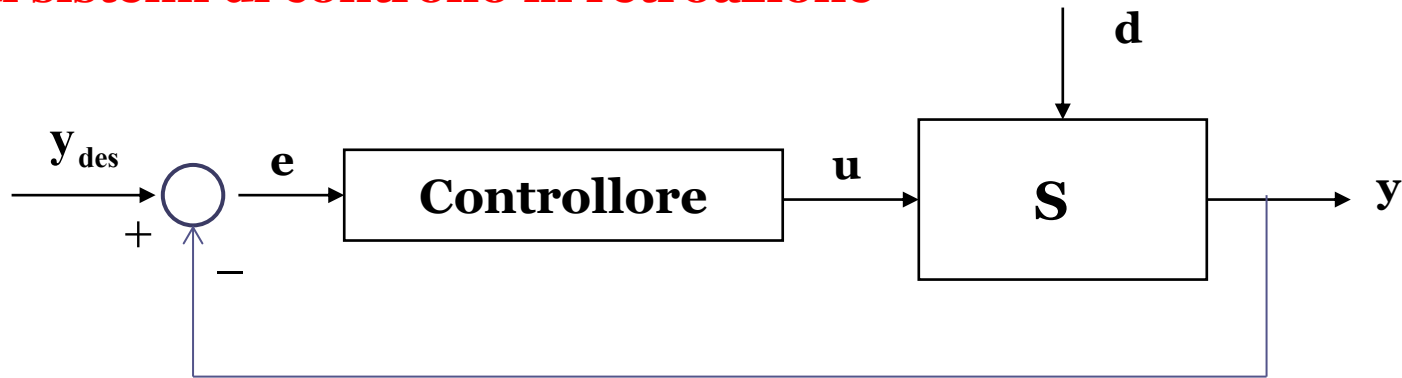
**più** le masse sono  
spinte dalla forza  
centrifuga,

**più** la valvola si  
chiuderà,

**meno** vapore  
alimenterà il motore,

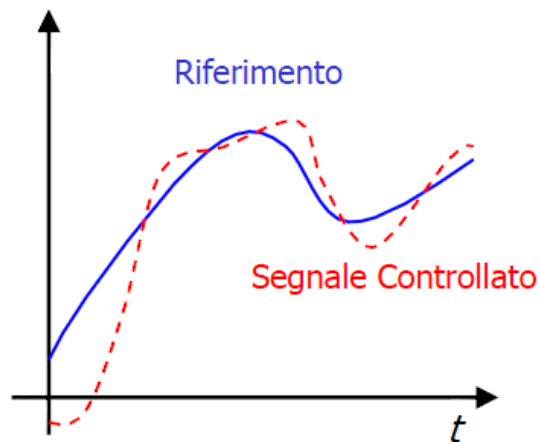
**meno** velocemente  
girerà l'asse!

## Sintesi di sistemi di controllo in retroazione

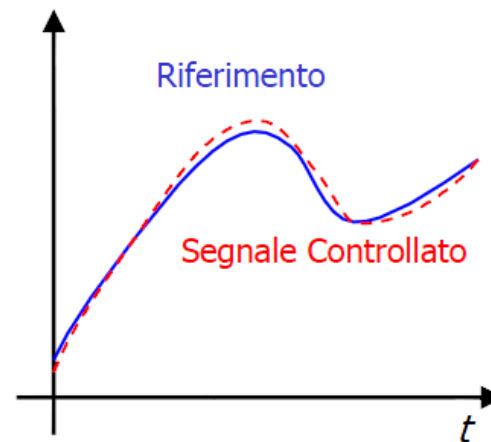


Assegnato un andamento **desiderato**  $y_{des}$  della variabile di uscita (**riferimento**, o **set-point**), si deve progettare un **controllore** che ne assicuri l' «inseguimento» entro limiti “accettabili”

- In presenza di disturbi
- In presenza di incertezze sui parametri che caratterizzano il modello matematico del processo S



Sistema di controllo scadente



Buon sistema di controllo

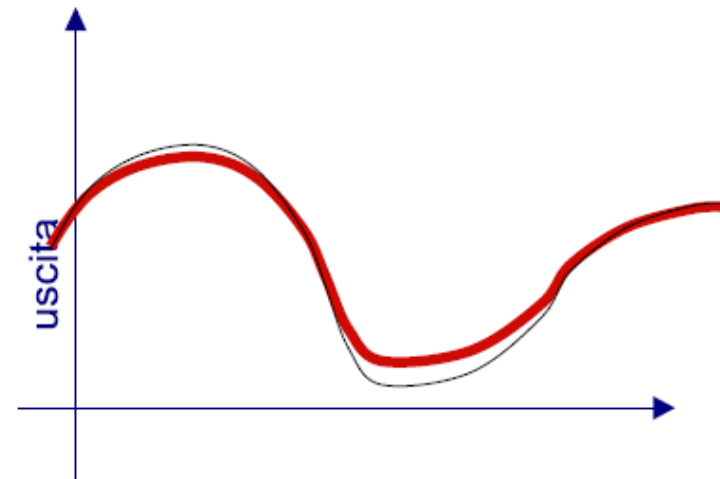
# sistemi di **regolazione** vs. sistemi di **asservimento**.

## Andamento desiderato dell'uscita

- Regolazione
- l'uscita è mantenuta costante intorno ad un valore predefinito



- Asservimento
- l'uscita segue l'ingresso il più possibile (inseguimento di traiettoria)



- **Controllo di Processo**

La variabile di uscita controllata non è di tipo meccanico ma rappresenta comunque una grandezza fisica (**temperatura, pressione, tensione, corrente, portata, livello, concentrazione**)



sistemi di **regolazione**

- **Controllo del Moto (Servomeccanismi)**

La grandezza controllata è una variabile di tipo meccanico (**posizione, velocità**)

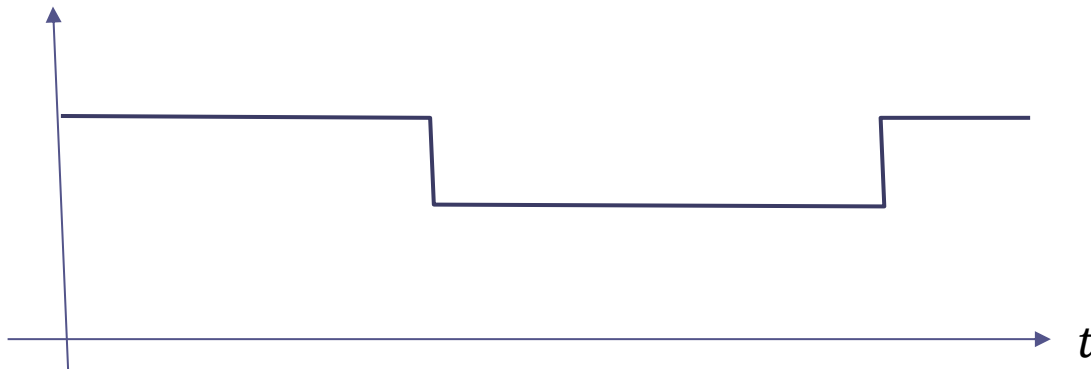


sistemi di **asservimento**

In numerosi casi pratici di sistemi di regolazione, soprattutto nell'industria di processo, il riferimento  $y_{des}(t)$  è un segnale **costante a tratti**.

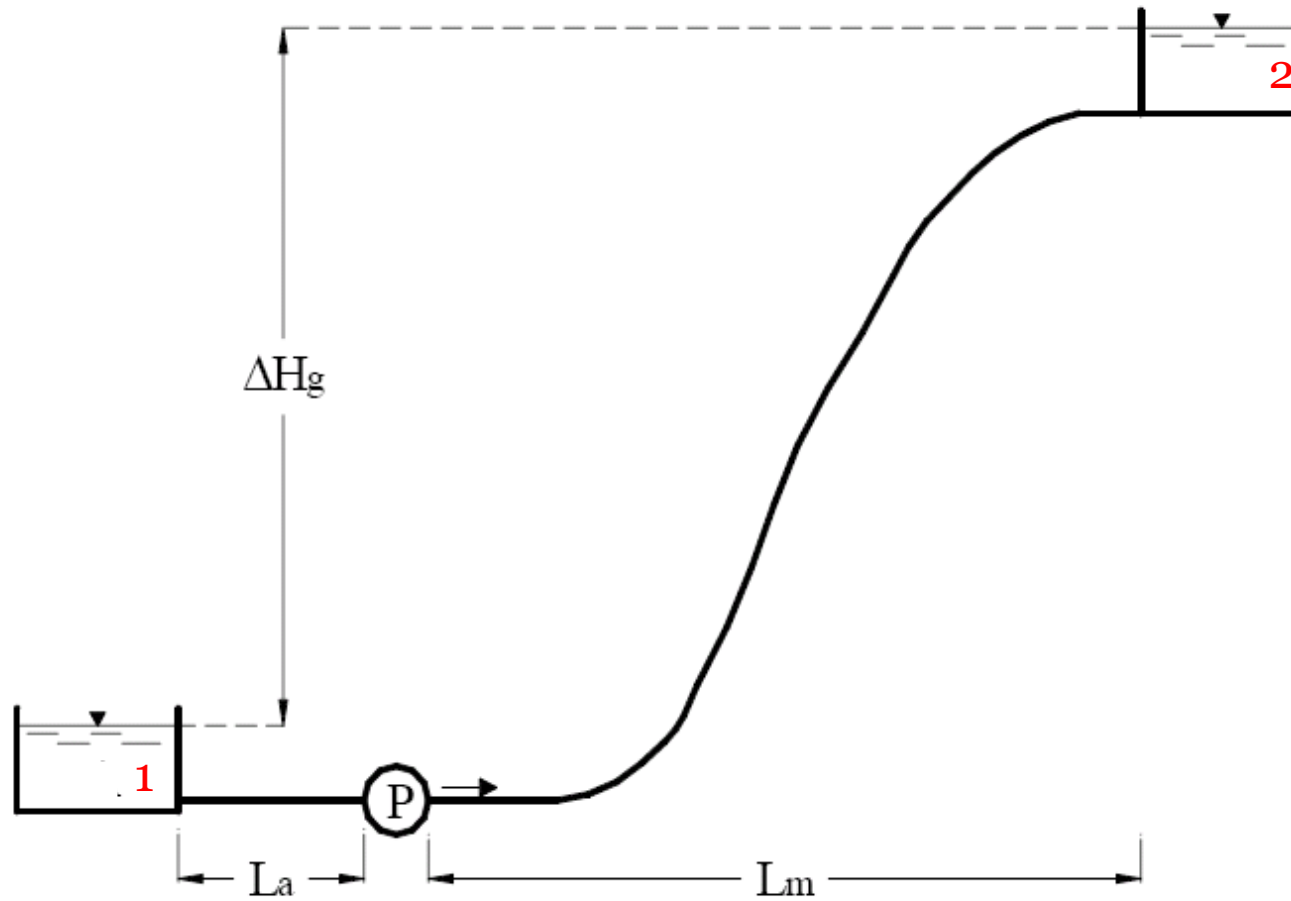
$y_{des}(t)$

Esempio di segnale costante a tratti

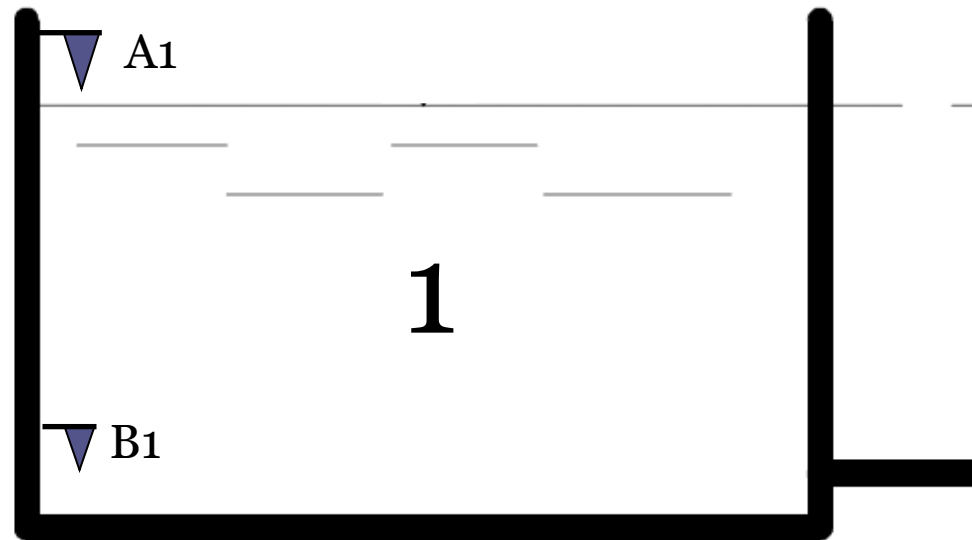


## SISTEMI DI AUTOMAZIONE - ESEMPIO

### Impianto di sollevamento

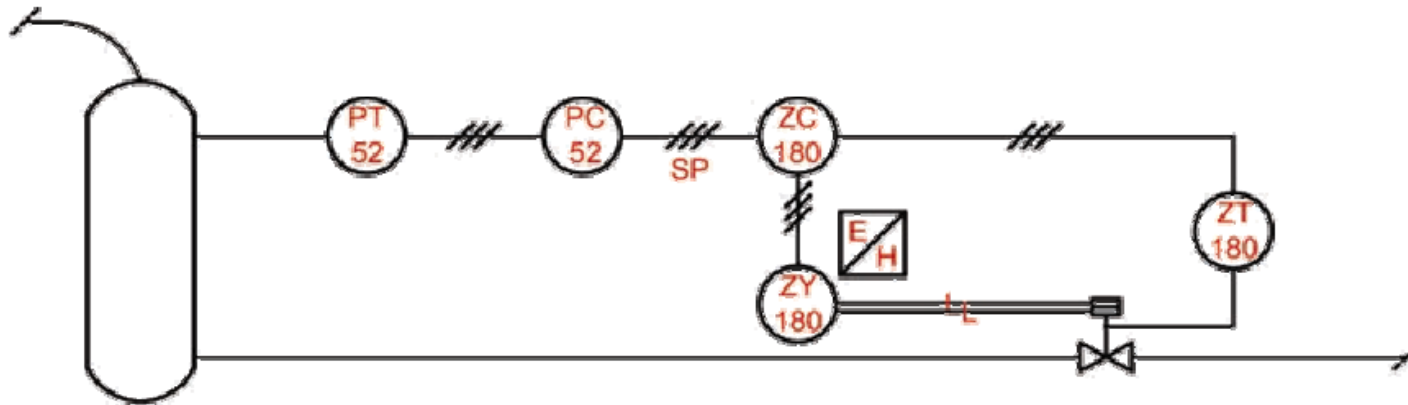


Si controlla la marcia e l'arresto della pompa utilizzando tipicamente misure ON/OFF di livello nei serbatoi.



Segnali di misura e logiche di controllo di tipo “booleano” -> linguaggi dedicati per la descrizione e l'implementazione del sistema di controllo (ad es. il linguaggio “ladder”)

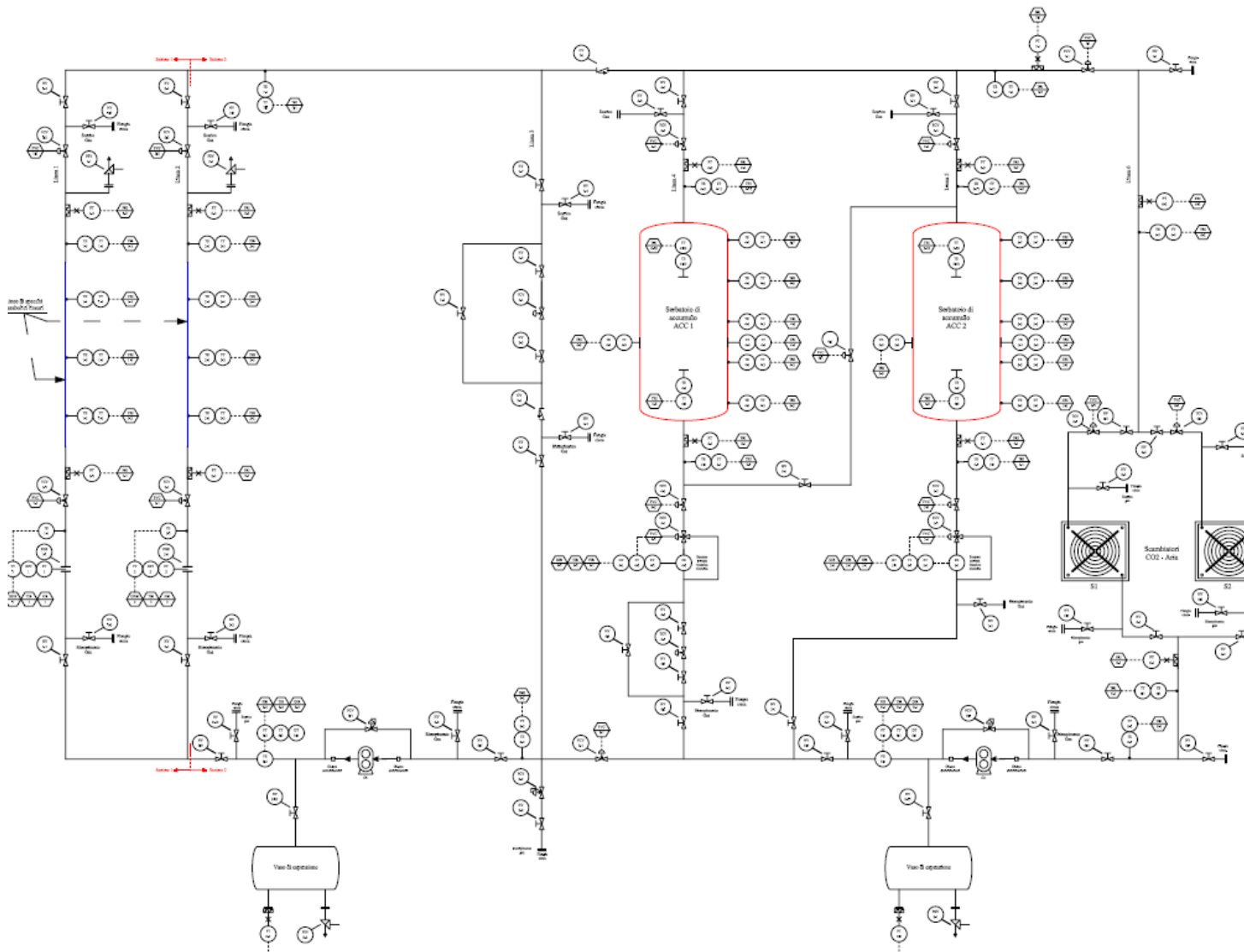
## Rappresentazione dei sistemi di controllo: i diagrammi P&I



- I diagrammi **Piping and Instrumentation** sono il formalismo più usato per la specifica e documentazione di un sistema di misura e controllo di processo
- I simboli utilizzati sono definiti nello standard ANSI/ISA 55.1-1984 (**Standards and recommended practices for instrumentation and control**)

# Impianto solare termodinamico

## Diagramma P&I



LEGENDA

- Strumentazione da campo con pagella fissa
- Strumentazione da campo mobile
- Strumentazione in fabbrica (solo controllo)
- Moduli Software Strumentazione da campo
- Valvola normale
- Valvola azionata per il controllo di pressione o servizio normale
- Valvola azionata manualmente aperta
- Valvola di compressione di servizio
- Dispositivo a interruzione per l'uscita di prova (Interlock)
- Presso volumetrico
- Positivo (assorbente)
- Assorbente a emissione superficiale per variazioni di temperatura
- Collegamento tattile (optico)
- Collegamento elettrico

Università degli Studi di Cagliari  
**SEAS**  
 Dipartimento di Ingegneria Telematica ed Elettronica  
 PIAZZA STABILE - 09100 CAGLIARI

**PROGETTO**  
**Estate Lab**  
 REALIZZAZIONE DI UN PROTOTIPO DI IMPIANTO SOLARE TERMODINAMICO A CONCENTRAZIONE

**COMPONENTI**  
 -

**OGGETTO DELL'OPERA**  
 PREPARAZIONE DELLA DOCUMENTAZIONE DA CAMPO PER L'IMPLEMENTAZIONE DEL SISTEMA DI CONTROLLO ELETTRICO

**TAV. 1**  
 PROGETTO DI  
 (nome file)  
 DATA: 10/05/2016  
 AUTORE: Ing. Michele Nura  
 APPROVATO: Prof. Dr. Dr. Dr.

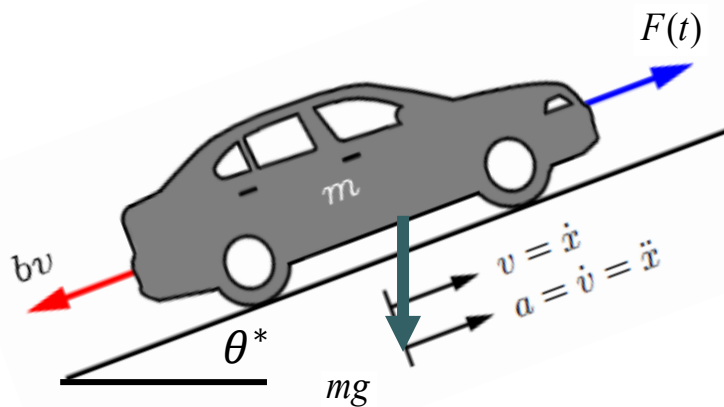
| REVISIONE | DATA       | CONTENUTO  | REVISIONE | DATA | CONTENUTO |
|-----------|------------|--|-----------|------|-----------|
| REV. 1    | 10/05/2016 | PROGETTO DI IMPIANTO SOLARE TERMODINAMICO A CONCENTRAZIONE |           |      |           |

In questo corso impareremo a **progettare sistemi di controllo per processi descritti da equazioni differenziali ordinarie (ODE) a coefficienti costanti (sistemi LTI).**

Prima di introdurre una modalità di rappresentazione per i sistemi dinamici LTI particolarmente appropriata ed utile a facilitare la sintesi di un sistema di controllo (tale rappresentazione prende il nome di «**funzione di trasferimento**» e costituisce uno dei concetti cardine del corso), sviluppiamo alcuni esempi introduttivi volti a farci familiarizzare ancora di più con i sistemi di controllo, e soprattutto volti anche a motivare ulteriormente la necessità, e l'importanza, di realizzare dei **sistemi di controllo in retroazione.**

## Cruise control di un veicolo

Discutiamo un problema di controllo reale.



Il veicolo, di massa  $m$ , è attuato dalla spinta  $F(t)$  e transita su una carreggiata con angolo costante di inclinazione  $\theta^*$ .  $F(t)$  rappresenta la spinta applicata al veicolo. Ipotizziamo di poter imporre un profilo arbitrario di forza applicata  $F(t)$  (**attuatore ideale**). E' una ipotesi plausibile ?

La forza resistente  $b v$ , dovuta all'effetto combinato di attriti e fenomeni aerodinamici, è assunta direttamente proporzionale alla velocità del veicolo, attraverso il coeff. di attrito viscoso  $b$ , ed agente in direzione opposta al moto.

La forza peso viene proiettata sulla direzione del moto.

Vogliamo realizzare un sistema di regolazione automatica della velocità longitudinale del veicolo :“cruise control”.

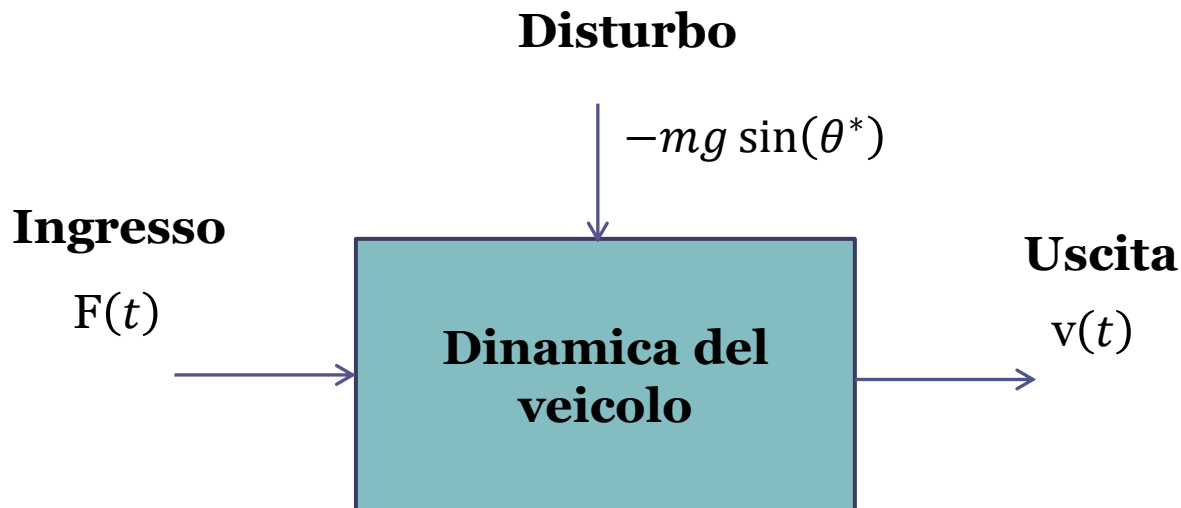
L'equazione differenziale che modella il sistema in esame è la seguente

$$m\dot{v}(t) + bv(t) = F(t) - mg \sin(\theta^*)$$

**Ingresso manipolabile:** Spinta applicata  $F(t)$

**Uscita:** velocità del veicolo  $v(t)$

**Disturbo esterno:** il termine costante  $-mg \sin(\theta^*)$  dovuto all'inclinazione della carreggiata ed al relativo contributo della forza peso




Si desidera che la velocità del veicolo converga verso il **valore desiderato costante**  $V_{des}$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = V_{des}$$

Una **possibile** legge di controllo che garantisce l'obiettivo che ci si è posti è la seguente:

$$F(t) = F^* = mg \sin(\theta^*) + b V_{des}$$

Componente costante che  
compensa la forza peso

Come si può mostrare che tale legge di controllo soddisfa l'obiettivo di portare il veicolo a muoversi alla velocità desiderata a partire da una arbitraria condizione iniziale  $v(0)$  ?

Sostituiamo nell'equazione differenziale il valore suggerito della spinta  $F(t)$  e risolviamola !

$$m\dot{v}(t) + bv(t) = F(t) - mg \sin(\theta^*) \quad (1) \quad \text{Eq. differenziale del sistema}$$

$$F(t) = mg \sin(\theta^*) + b V_{des} \quad (2) \quad \text{Legge di controllo}$$

$$m\dot{v}(t) + bv(t) = b V_{des} \quad (3) \quad \text{Equazione differenziale che governa il sistema controllato (ottenuta sostituendo (2) in (1))}$$

La soluzione della (3) è la somma fra la soluzione dell'omogenea associata

$$v_{oA}(t) = \mu e^{-\frac{b}{m}t} \text{ ed una soluzione particolare } v_p(t) = V_{des}$$

$$v(t) = v_{oA}(t) + v_p(t) = \mu e^{-\frac{b}{m}t} + V_{des}$$

Imponendo che all'istante iniziale la velocità assuma il generico valore  $v(0)$  si ottiene  $\mu = v(0) - V_{des}$ , e quindi:

$$v(t) = (v(0) - V_{des})e^{-\frac{b}{m}t} + V_{des}$$

Poiché i coefficienti  $b$  ed  $m$  sono per definizione positivi, tale curva converge esponenzialmente al valore desiderato di velocità  $V_{des}$

$$v(t) = (v(0) - V_{des})e^{-\frac{b}{m}t} + V_{des}$$

La rapidità di convergenza dipende dal rapporto  $\frac{b}{m}$  (maggiore è tale rapporto, più rapidamente il segnale converge al valore di regime).

Immaginiamo di dover applicare nella pratica una legge di controllo del genere.

**Ci soddisfa ? Quali sono le principali limitazioni ?**

La **prima e principale limitazione pratica** è che la «legge di controllo»

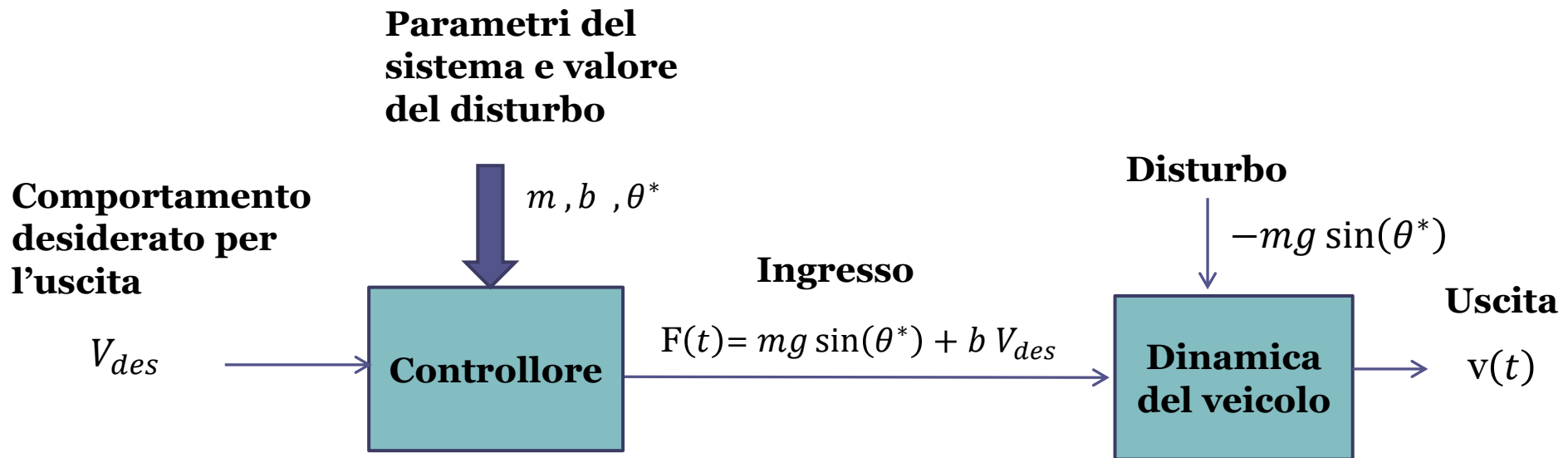
$$F(t) = mg \sin(\theta^*) + b V_{des}$$

**può essere applicata solo se si conoscono perfettamente i parametri** che caratterizzano il funzionamento del veicolo, nella fattispecie la massa  $m$  ed il coeff. di attrito  $b$ , e l'angolo di inclinazione della carreggiata. Nel momento in cui il valore della spinta applicata dovesse differire da quello «nominale», a causa di una incertezza sul valore dei parametri di processo, il valore di regime della velocità sarebbe diverso da quello desiderato  $V_{des}$ .

In secondo luogo, la rapidità con la quale la velocità del veicolo approssima asintoticamente il valore desiderato è non modificabile, e dipende unicamente dal rapporto  $\frac{b}{m}$ , cioè dai parametri del sistema.

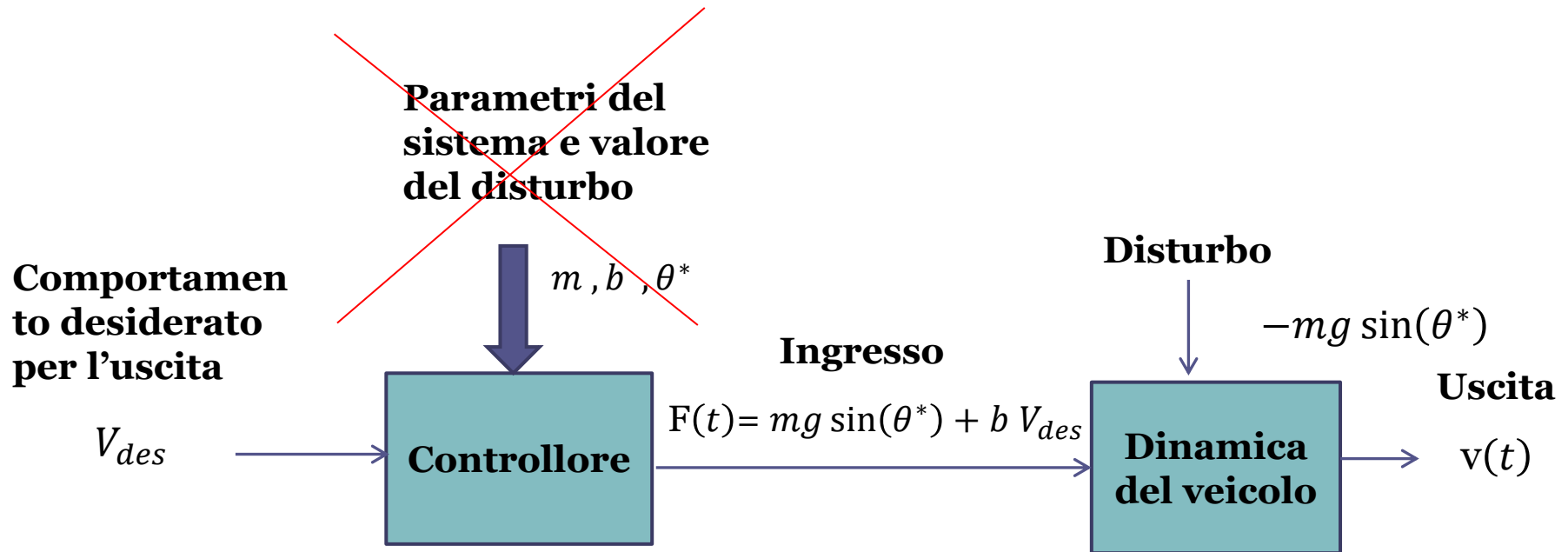
Si può ben capire che ove tale rapporto non assumesse un valore sufficientemente grande si avrebbe un transitorio di durata eccessiva che renderebbe inutilizzabile il sistema di controllo (nessuno vorrebbe utilizzare un sistema di cruise control che, dal momento in cui si imposta la velocità desiderata, richieda un'attesa di 30 minuti prima che questa sia raggiunta)

Cerchiamo di capire perché questo improbabile sistema di controllo soffre di tutti questi problemi. Rappresentiamone graficamente la struttura per poterlo «catalogare»



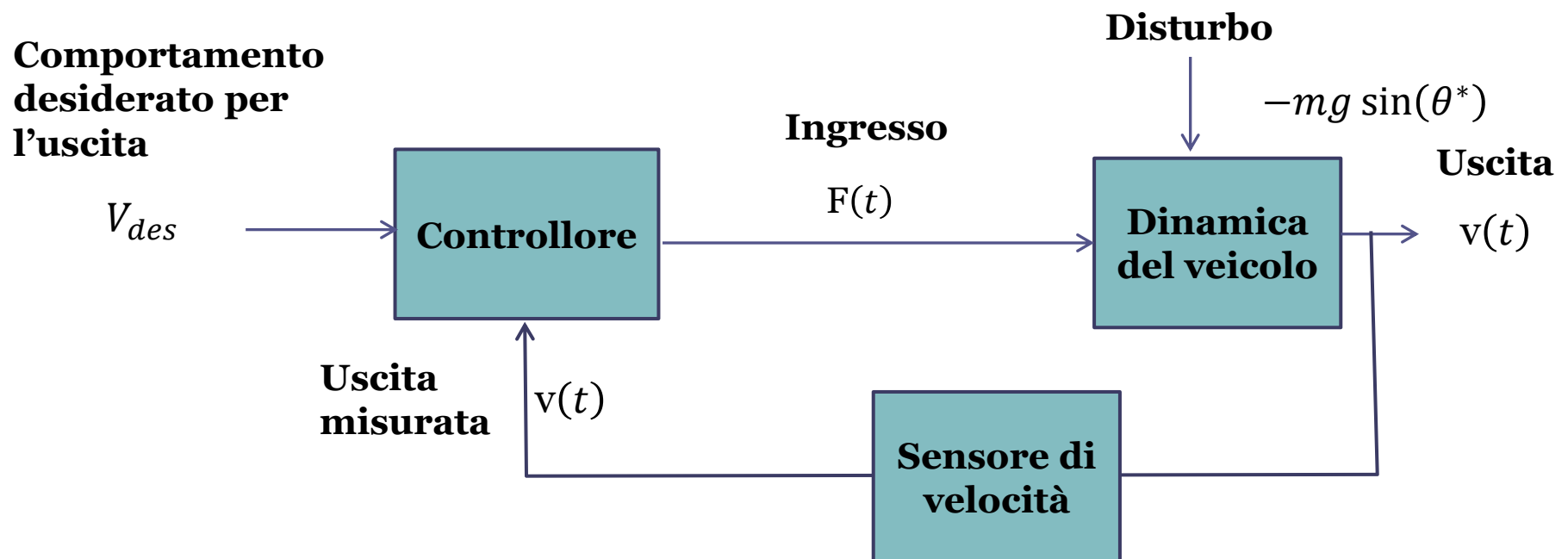
Questo sistema di controllo **non implementa nessun tipo di retroazione**. Non vi è un «effetto correttivo» dell'uscita sull'ingresso. **E' un sistema di controllo a ciclo (o «ad anello») aperto** (in contrapposizione ai sistemi di controllo a ciclo chiuso, o «in retroazione»)

Come deve essere strutturato, da un punto di vista «architeturale», un controllo in retroazione che possa fornire delle prestazioni migliori ?



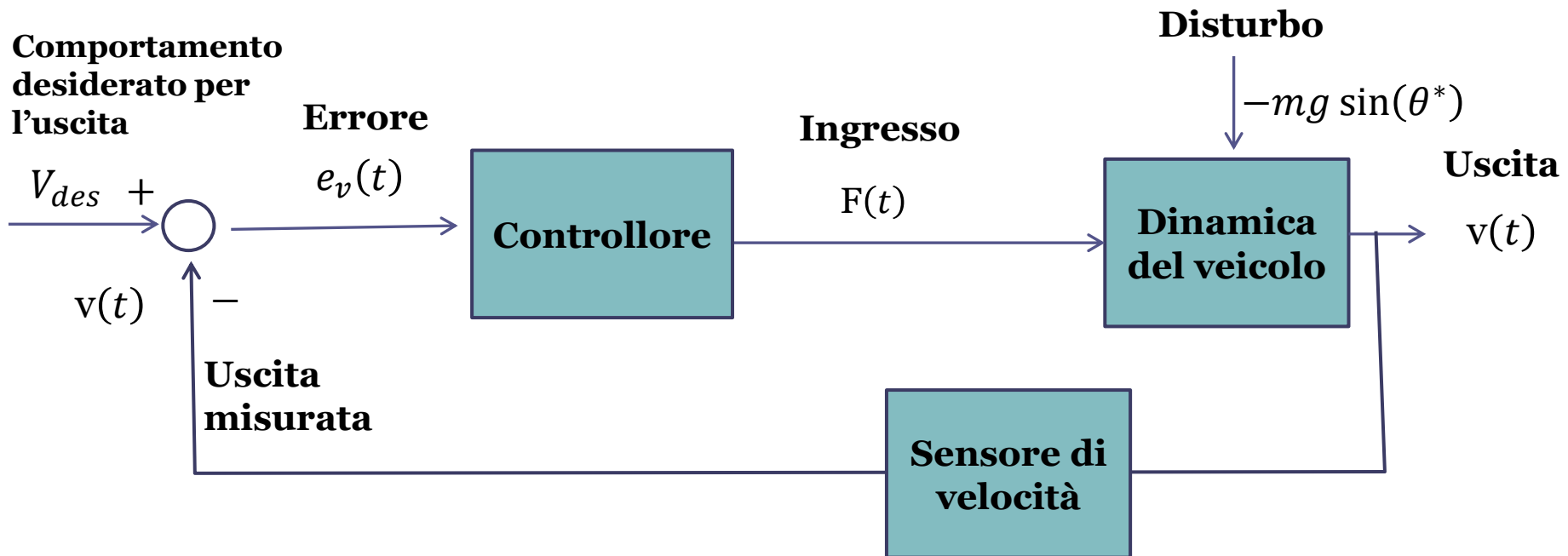
In primis la legge di controllo **non deve dipendere dalla conoscenza esatta dei parametri del sistema.**

In secondo luogo, **il controllore deve avere accesso, istante per istante, alla misura della velocità** per poter effettuare una pianificazione più accurata del profilo di spinta da applicare al veicolo



Con una soluzione così strutturata è possibile ottenere prestazioni decisamente superiori. E' possibile, in particolare, risolvere il problema **senza conoscere i valori dei parametri del sistema e l'ampiezza del disturbo**.

Appare ragionevole che **il controllore elabori il segnale di errore (differenza fra il valore desiderato ed il valore corrente dell'uscita)**, in modo da accedere ad una chiara informazione in merito al fatto che il veicolo debba essere accelerato o rallentato, ed in che misura.



## Che tipo di elaborazioni vengono svolte all'interno del blocco «Controllore»?

Esso deve elaborare il «segnale di errore»  $e_v(t)$  e determinare, istante per istante, il valore della spinta  $F(t)$  che deve essere applicata al veicolo al fine di garantire che la velocità del veicolo tenda al valore desiderato.

La più semplice «legge di controllo» che si può ipotizzare è quella denominata «controllore proporzionale», in cui l'ingresso applicato al processo si determina moltiplicando il segnale di errore per una costante

**controllore proporzionale**       $F(t) = K_p [V_{des} - v(t)] = K_p \cdot e_v(t)$

Nella presente applicazione di cruise control, tale legge di controllo non va bene (il motivo sarà chiarito più avanti).

In generale, come vedremo meglio nel prosieguo del corso, il controllore implementa un legame fra  $e_v(t)$  ed  $F(t)$  più complesso, avente la forma di una equazione differenziale lineare a coefficienti costanti.

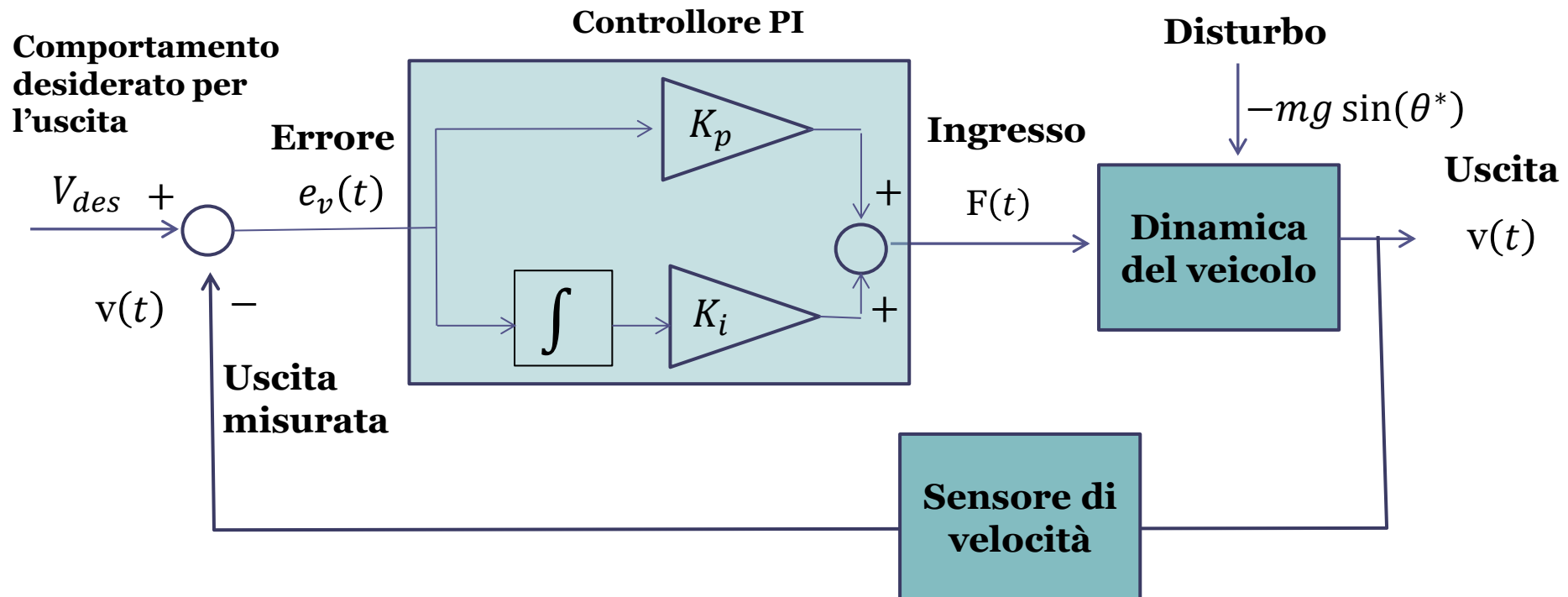
Una legge di controllo in grado di risolvere brillantemente questo problema è la seguente:

$$F(t) = K_p [V_{des} - v(t)] + K_i \int_0^t [V_{des} - v(\tau)] d\tau = K_p \cdot e_v(t) + K_i \int_0^t e_v(\tau) d\tau$$

Questa legge di controllo prevede che il segnale di ingresso al processo si determini sommando fra loro due componenti: la prima (componente «proporzionale», in rosso) è direttamente proporzionale all'errore di velocità, la seconda (componente «integrale», in blu) è proporzionale al suo integrale.

Tale algoritmo viene denominato «controllore proporzionale-integrale» (in breve, «controllore PI»)

## Schema a blocchi



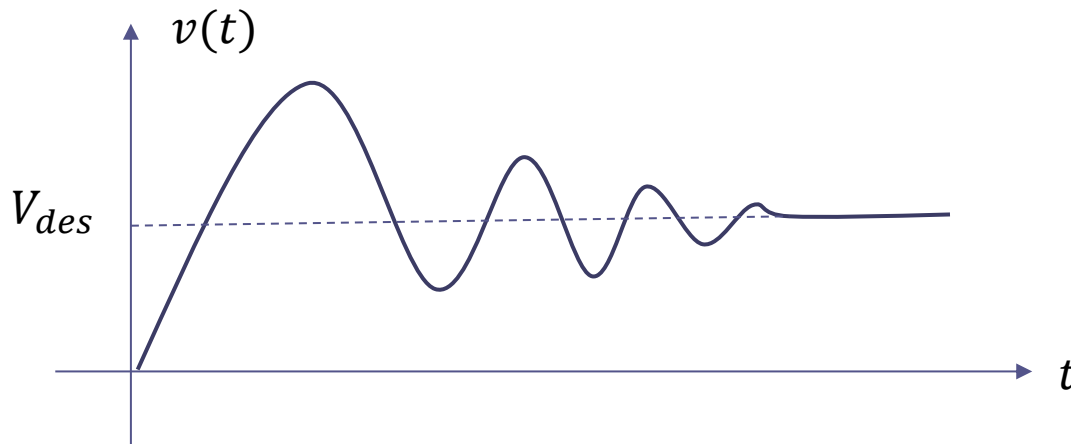
La legge di controllo introdotta poc'anzi è l'algoritmo che trova maggiori applicazioni nella realtà industriale. Si stima che oltre l'80% degli anelli di controllo sia realizzato impiegando tale algoritmo (in forme variamente modificate).

Un controllore che implementi tale algoritmo viene denominato **controllore «PI»** (proporzionale-integrale) E' caratterizzato da due parametri di taratura,  $K_p$  e  $K_i$ , detti rispettivamente «guadagno proporzionale» e «guadagno integrale», che devono essere tarati in maniera opportuna onde conferire al sistema di controllo prestazioni adeguate.

Non siamo ancora in grado di analizzare le prestazioni del sistema di cruise control che abbiamo proposto, ma ci arriveremo presto.

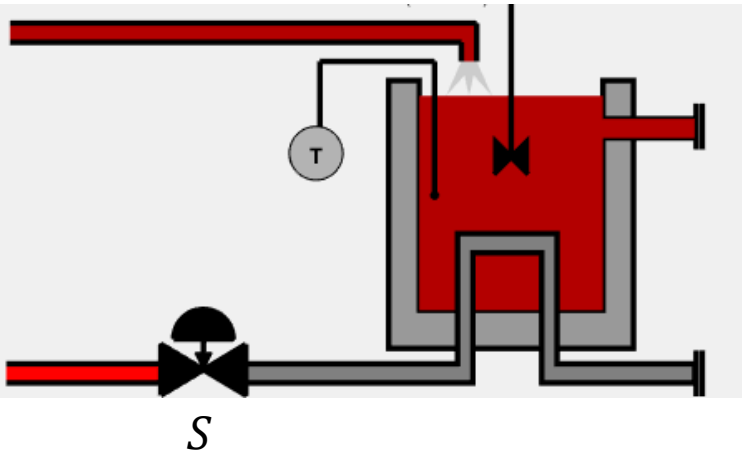
Ciò che mostreremo è che il controllore proporzionale-integrale proposto garantisce che qualunque valore positivo si attribuisca ai suoi due guadagni il valore di regime della velocità del veicolo coincide con quello desiderato.

Ciò non significa che la scelta dei guadagni sia irrilevante. Tali guadagni sono, come detto, da scegliersi in maniera opportuna onde conferire al sistema a ciclo chiuso una risposta transitoria soddisfacente, sia in termini di «rapidità» nell'evolvere verso la condizione di regime che anche per quanto concerne l'assenza di fenomeni transitori indesiderati quali ad esempio oscillazioni.



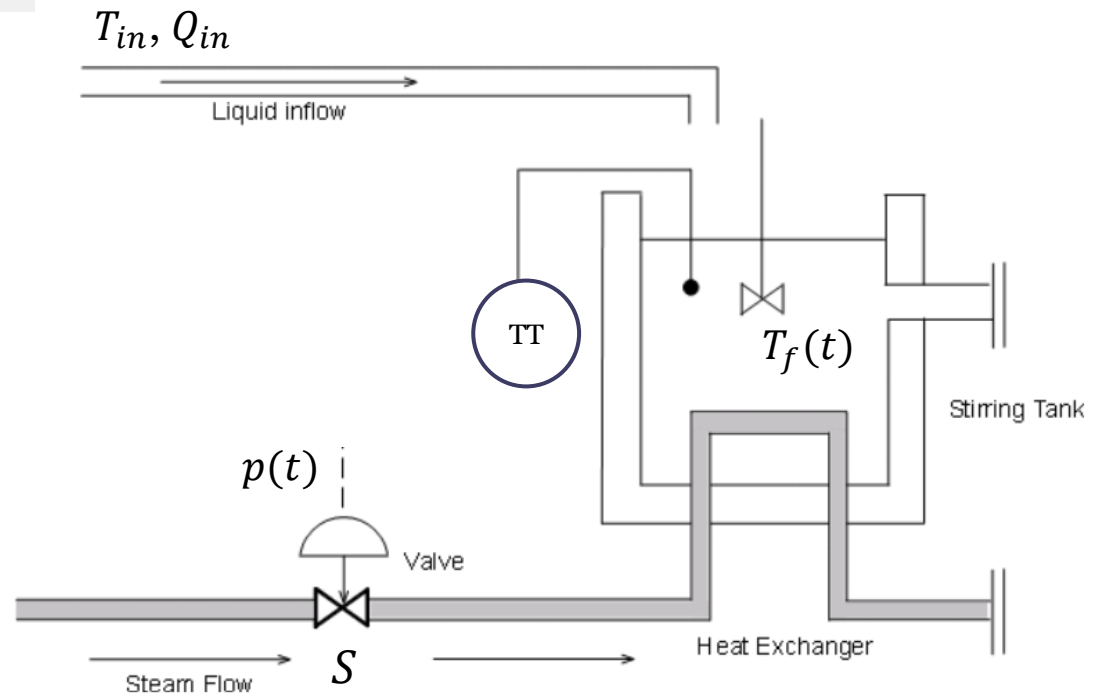
*Sarebbe accettabile in un veicolo commerciale un comportamento del cruise control come quello evidenziato nella curva a sinistra ?*

Analizziamo un altro esempio inerente stavolta il controllo di uno **scambiatore di calore**.



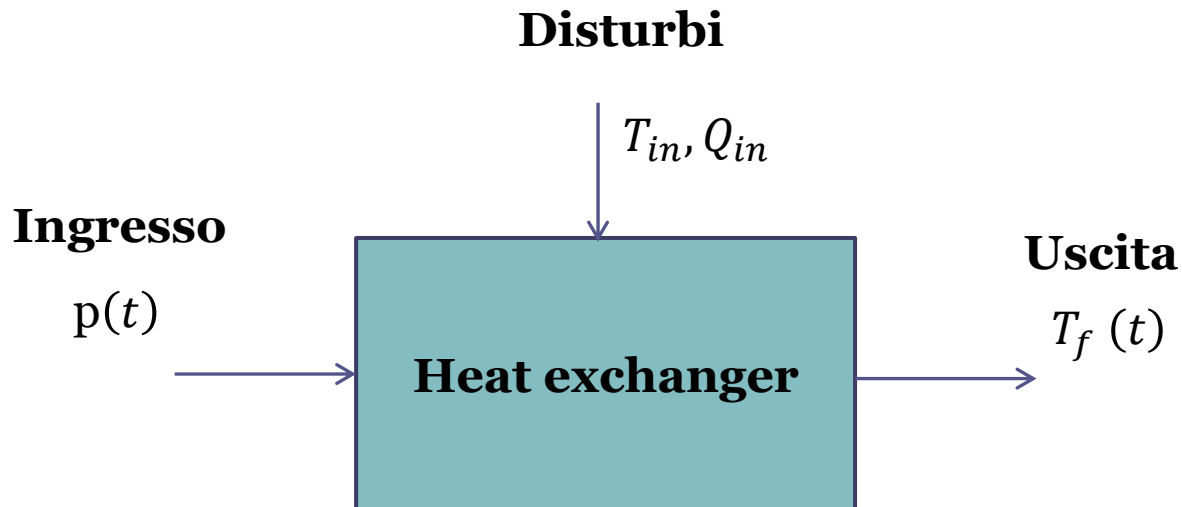
Un liquido a temperatura  $T_{in}$  viene immesso con portata  $Q_{in}$  in un serbatoio all'interno del quale deve essere riscaldato ad una temperatura  $T_{des}$  prima di essere pompato altrove. Nel serbatoio transita una linea percorsa da vapore ad alta temperatura.

Il processo è attuato per mezzo della servovalvola  $S$  attraverso la quale è possibile modulare la portata del vapore. Il segnale di comando  $p(t)$  (che varia da 0% a 100%) viene detto «apertura» (opening) della servovalvola

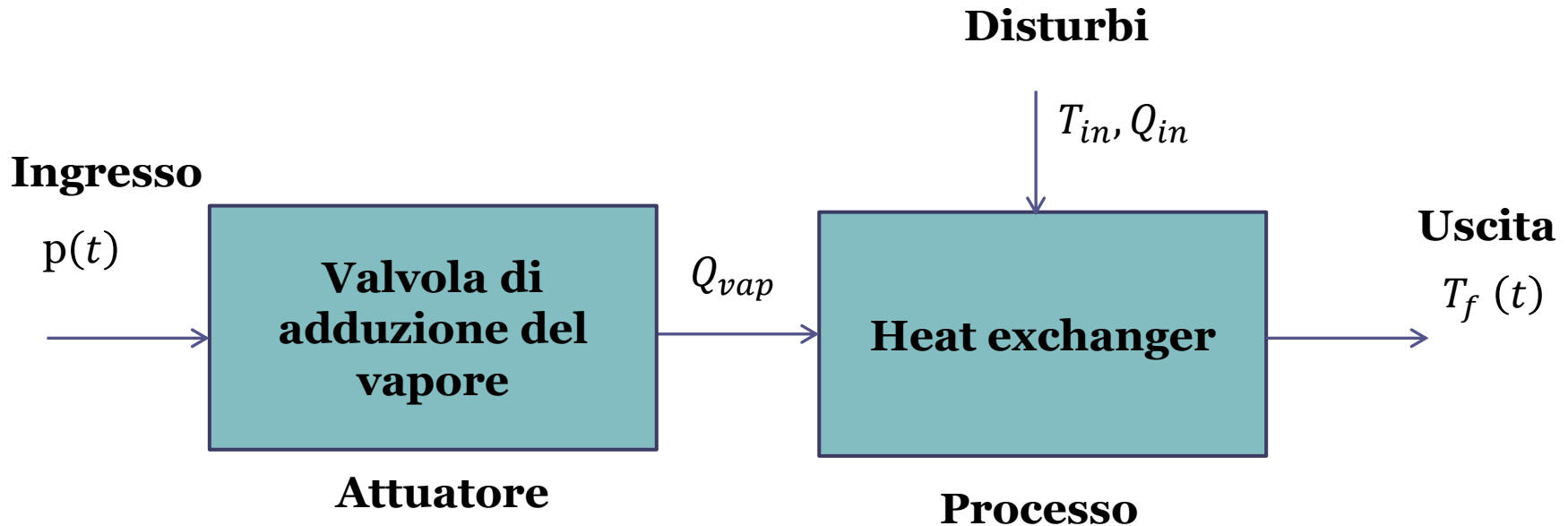


E' un processo la cui dinamica predominante è costituita da fenomeni di scambio termico fra il liquido contenuto nel serbatoio ed il vapore ad alta temperatura.

**Con l'obiettivo di realizzare un sistema di controllo, rappresentiamo il sistema in modalità black box come segue**



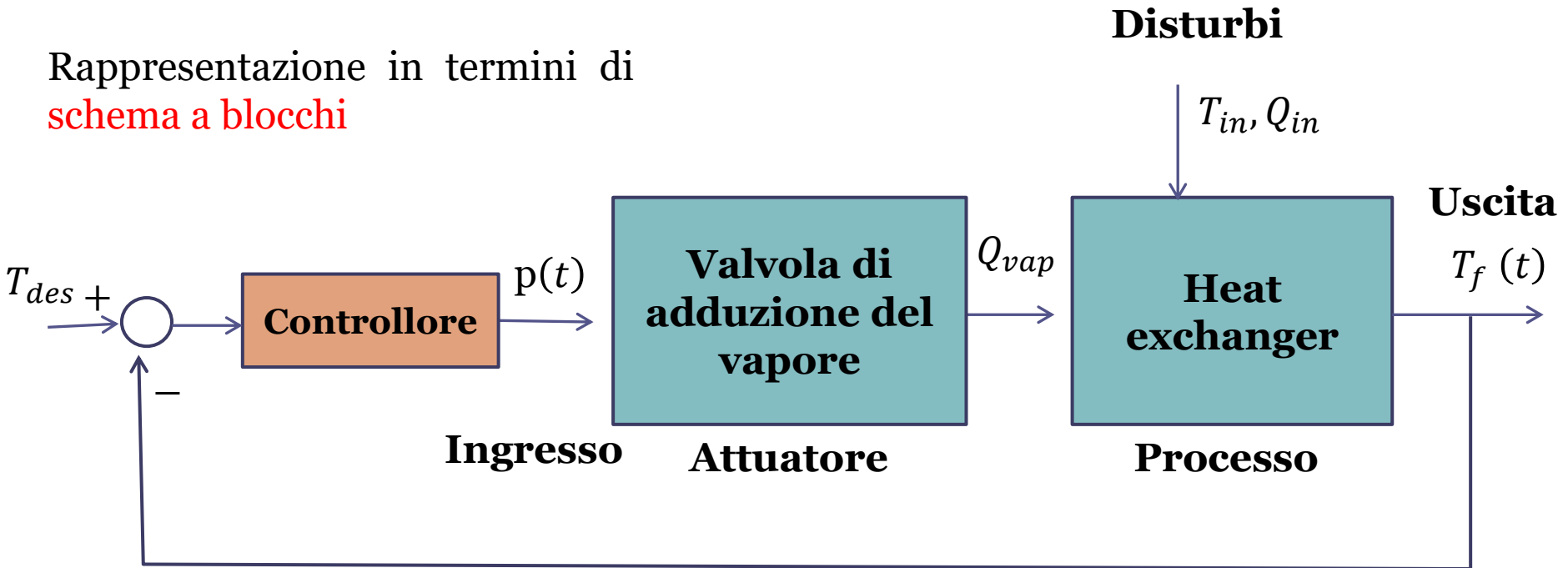
Una rappresentazione più articolata di tale dispositivo, che distingue il processo vero e proprio dal blocco attuatore, potrebbe essere la seguente



**Come lo controlliamo ?**

Risulta imprescindibile l'impiego di una **architettura in retroazione** come quella in figura, in cui l'impiego di un controllore proporzionale-integrale costituisce in genere una buona scelta progettuale.

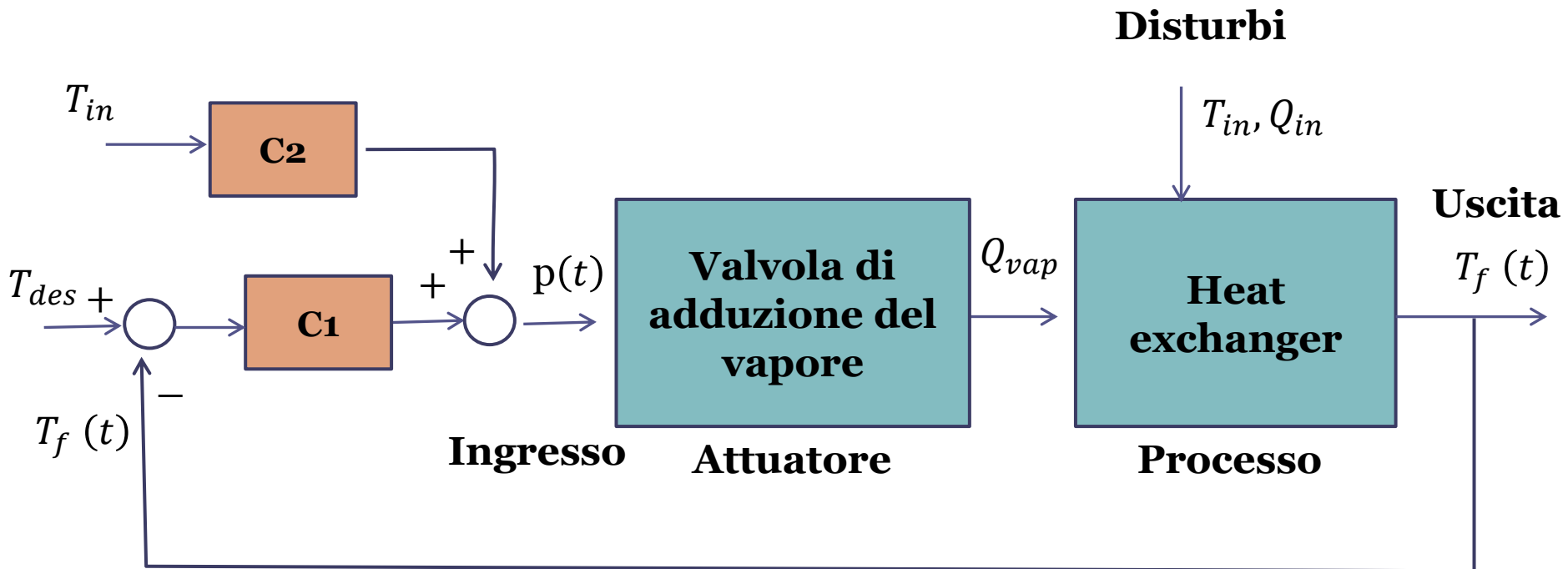
Rappresentazione in termini di **schema a blocchi**

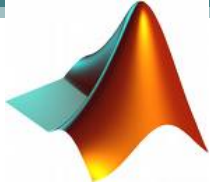


Questa è la notazione che impiegheremo nel corso, e dobbiamo imparare a pensare ai sistemi di controllo in tali termini. Ciò ci metterà a disposizione dei potenti strumenti di analisi, anche di architetture complesse, e di sintesi.

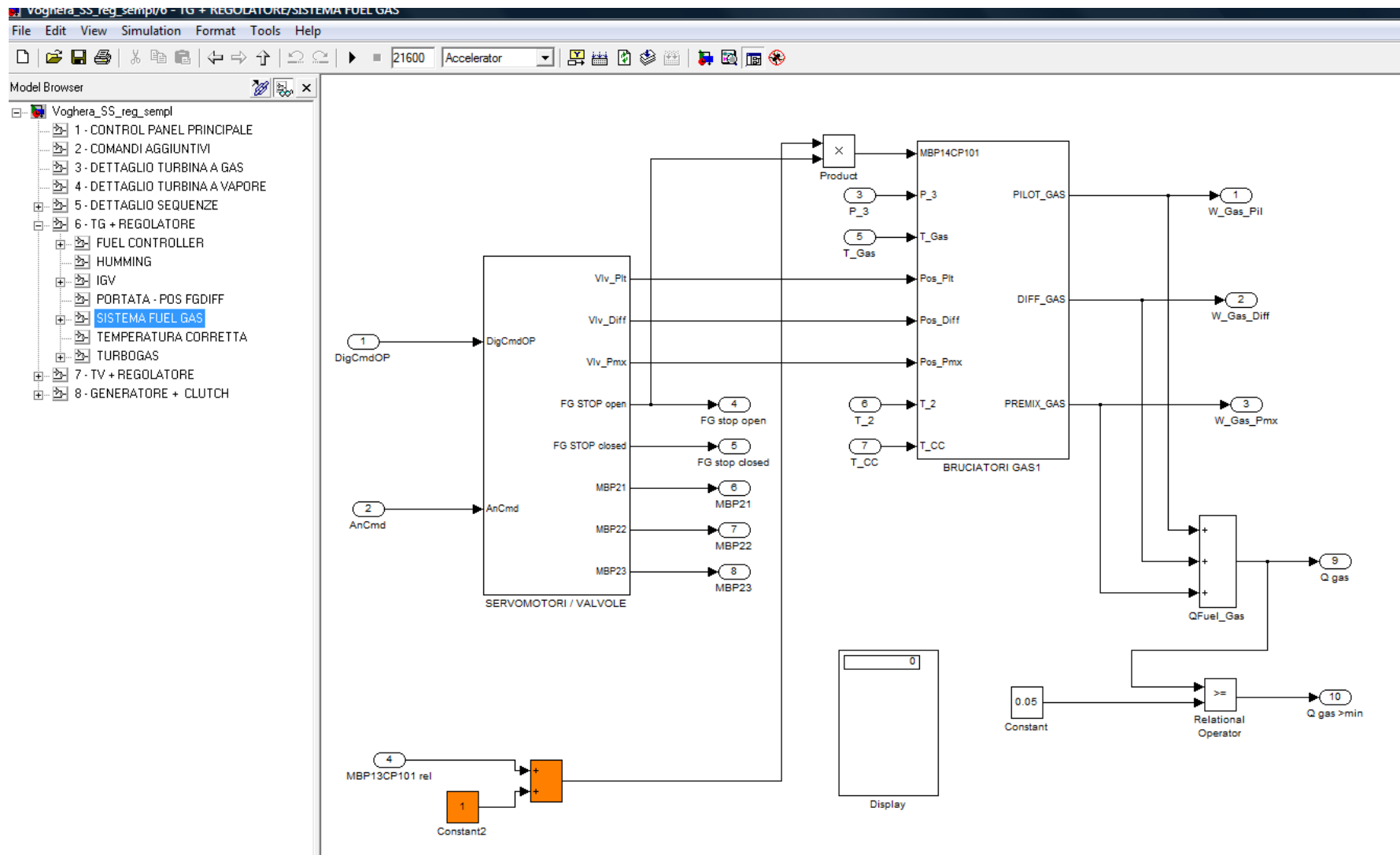
Se è possibile misurare anche la temperatura e/o la portata del fluido in ingresso (se è cioè possibile misurare il segnale disturbante) può essere realizzata una regolazione più sofisticata in cui il controllore ha accesso anche a tale misura e può «anticipare» opportune misure correttive. Vedremo più avanti tali soluzioni «avanzate», che saranno classificate con il termine di controllo «*feed-forward*» (o «controllo con compensazione del disturbo»)

In termini di **schema a blocchi**





# SIMULAZIONE DINAMICA - MATLAB-SIMULINK



## Simulazione interattiva di un sistema di controllo in retroazione per un levitatore magnetico



`vrmaglev_lezione1.slx`

Conclusa questa articolata introduzione, iniziamo a dotarci degli strumenti necessari a sviluppare procedure di analisi e sintesi di sistemi di controllo.

Il prossimo passo è introdurre un formalismo conveniente per la rappresentazione di sistemi dinamici LTI, che consenta, fra le altre cose, di valutare facilmente le conseguenze della interconnessione fra sistemi dinamici secondo schemi in retroazione come quello mostrato sopra.

Tale formalismo, detto «**Funzione di Trasferimento**», ha come prerequisito un particolare strumento matematico, la trasformata di Laplace, e costituirà uno dei concetti, e degli strumenti, fondamentali del corso.