

**A.A. 2022-23**

# 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.

**Obbiettivi 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

### **Argomenti teorici** [40 ore]

Richiami. Modelli ingresso-uscita e modelli espressi in variabili di stato. Trasformata di Laplace. Significato e parametri di una funzione di trasferimento. Stabilità. Criterio di Routh-Hurwitz. Parametri e comportamento di sistemi dinamici elementari [Bolzern Capitoli 1, 2, 4, 5, 6, 9]

Luogo delle Radici. Significato e regole di tracciamento. Taratura del luogo. Equazione dei punti doppi. Angoli di partenza e di arrivo. [Bolzern Capitolo 12]

Sospensioni attive e passive per autoveicoli. Generalità. Modelli quarter car, half car, e full car. Controllo di sospensioni attive. Miglioramento del confort e controllo dell'assetto. Sospensioni semi-attive. [Dispensa docente, Bolzern paragrafo. 19.3].

Specifiche a regime. Sistemi di tipo 0,1 e 2. Precisione a regime e reiezione dei disturbi. Attenuazione di disturbi sinusoidali. [Dispensa docente; Bolzern Capitolo 12]

## CONTROLLI AUTOMATICI

### PROGRAMMA DEL CORSO (cont.)

#### **Argomenti teorici** [40 ore]

Sistemi con ritardi finiti. Esempi. Stabilità a ciclo chiuso. Controllo con predittore di Smith [Dispensa docente]

Sintesi mediante Luogo delle radici. Sintesi diretta. Implementazione digitale dei controllori. Linearizzazione. Assegnamento poli e osservatori di stato.

Sintesi mediante regolatori PID. Regole di taratura. Configurazioni PI-D ed I-PD. [Bolzern Capitoli 12, 14]

Schemi avanzati per il controllo di processo [ Magnani capitolo 8]

Schemi anti wind-up.

Controllo in cascata. Controllo feedforward. Compensazione di disturbi misurabili.

Model-following. Controllo con override. Controllo multivariabile. Esempi.

Automazione mediante PLC. Generalità. Linguaggio a contatti e SFC [Slides lezione],

Diagrammi P&I. [Slides lezione; Magnani, appendice A.1].

# CONTROLLI AUTOMATICI

## PROGRAMMA DEL CORSO (cont.)

### **Esercitazioni al calcolatore [16 ore]**

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

### **Attività di Laboratorio [4 ore]:**

- Controllo di un servomotore elettrico in corrente continua

Simulazione con verifica sperimentale del modello.  
Implementazione e taratura di controllori PID.

## 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

[https://www.unica.it/unica/it/ateneo\\_s07\\_ss01.page?contentId=SHD30737](https://www.unica.it/unica/it/ateneo_s07_ss01.page?contentId=SHD30737)



UniCa > Ateneo > Docenti e ricercatori > Alessandro Pisano

# Alessandro Pisano

### Dipartimento di Ingegneria elettrica ed elettronica

<b>Ruolo</b>	Professore associato
<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

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

click


**Università degli Studi di Cagliari**

ITA ENG

Seguici su:






Cerca

Ateneo Futuri studenti Studenti Laureati Ricerca Enti e imprese



[UniCa](#) > [Ateneo](#) > [Docenti e ricercatori](#) > [Alessandro Pisano](#) > [Materiale didattico](#)

## Alessandro Pisano

Filtro risultati

**Controllo dei sistemi energetici - AA 2021-22**  
 Data: 02 marzo 2022  
 Home page del corso "Controllo dei sistemi energetici" - AA 2021-22

**Simulazione dei sistemi dinamici con Matlab Simulink - AA 2021-22**  
 Data: 09 dicembre 2021

**Controlli Automatici A.A. 2021-2022**  
 Data: 20 dicembre 2021  
 Controlli Automatici - materiale didattico e informazioni - A.A. 2021-2022

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

Nella pagina «Controlli Automatici AA 2022-2023» (**non ancora creata**) sarà pubblicato tutto il materiale didattico e gli avvisi.



**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

Prova intermedia scritta e prova finale scritta

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**

I sistemi di controllo servono a fare in modo che un determinato «**sistema**» (un fenomeno fisico, una apparecchiatura, un processo industriale,...) **si comporti secondo modalità di funzionamento imposte dall'esterno**, e scelte dal progettista.

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

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

# Control Systems are Ubiquitous

<http://ieeecss.org/control-systems-are-ubiquitous>

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

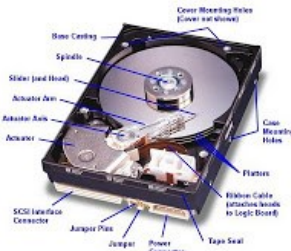


Process control



Noise canceling headphones

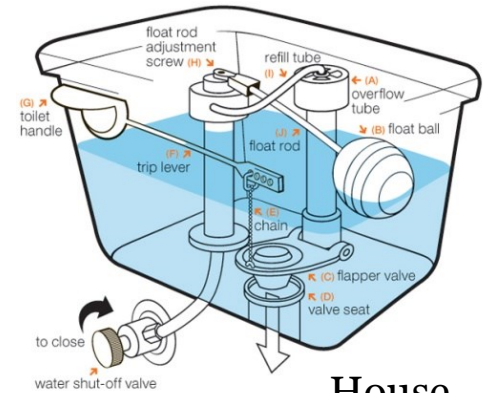
HDD



Aerospace



Mobility



House



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) ?

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

 Download

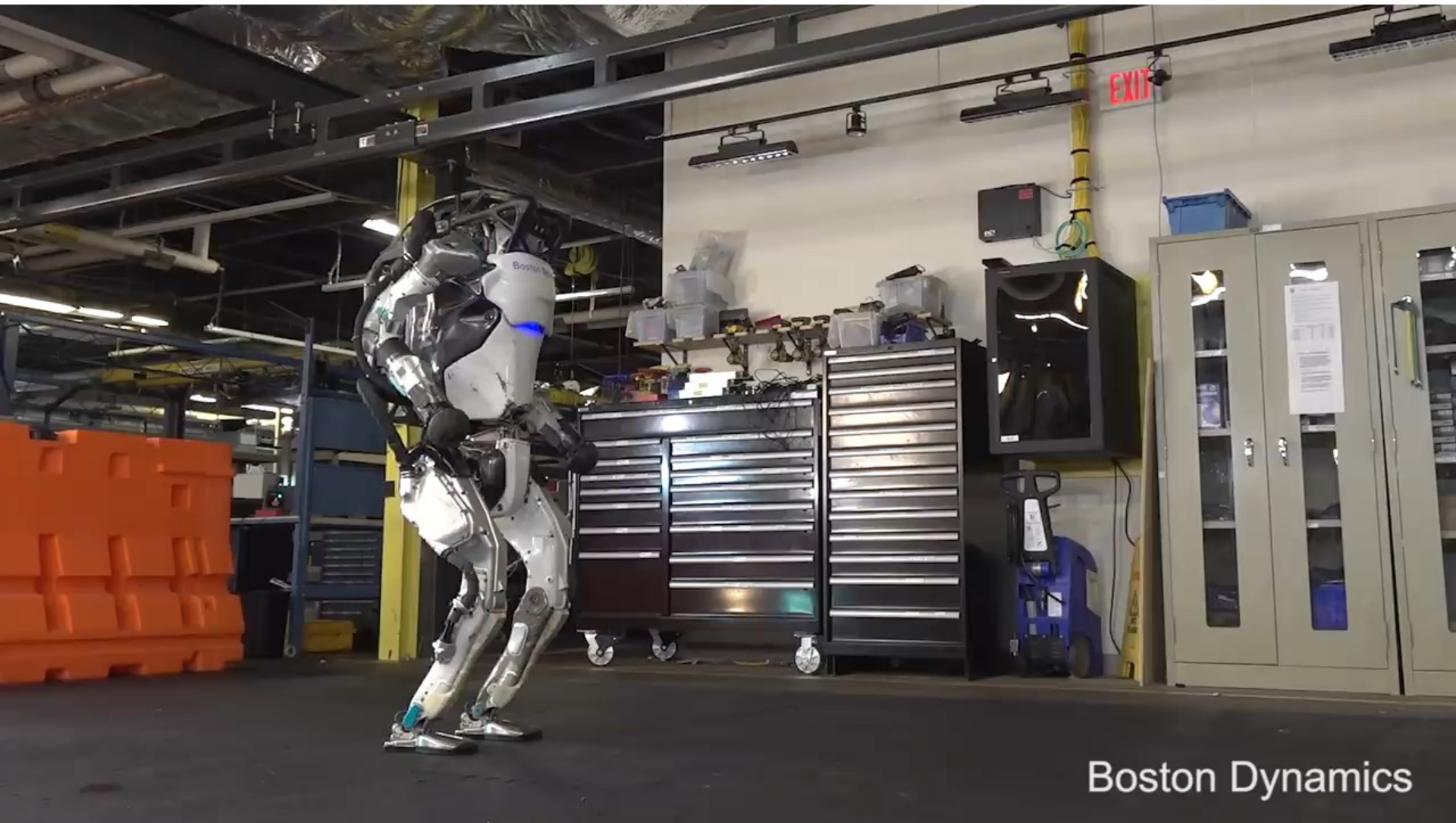
 Download

 Download

 Download

- [illegible]

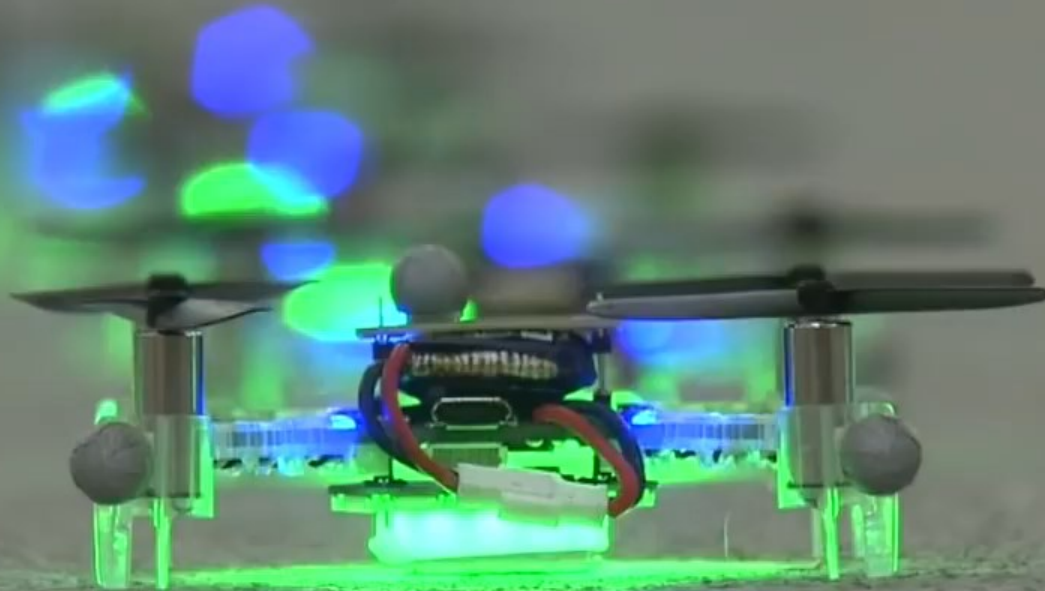




Boston Dynamics



CGTN



REUTERS

<https://www.youtube.com/watch?v=MlFtHuXPbv4>

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

Quali sono le grandezze modificabili attraverso le quali possiamo influenzare dall'esterno il comportamento del processo ?

INGRESSI

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

USCITE

Quali relazioni intercorrono fra le grandezze di ingresso e la grandezze di uscita ?

MODELLO MATEMATICO DEL  
PROCESSO

## 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)

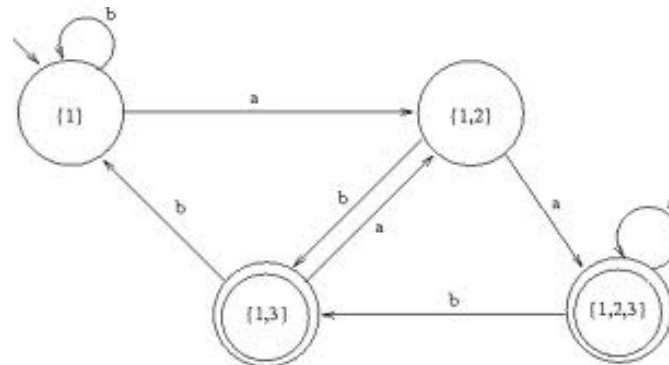
$$M\ddot{x} + B\dot{x} + kx = F(t)$$

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

**Equazioni alle differenze**

$$y(k) = y(k-1) + y(k-2) + u(k) \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

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



Fenomeno fisico



Sistema dinamico



Grandezze di  
interesse



Variabili del sistema

“Cause”



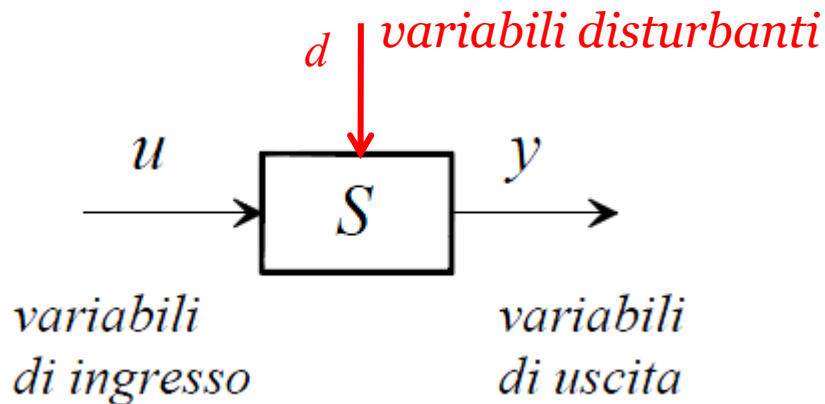
Ingressi

“Effetti”



Uscite

## Sistemi dinamici



Un sistema dinamico si interfaccia con il “resto del mondo” per mezzo di una serie di variabili, che definiremo di **ingresso**, ed altre che definiremo di **uscita**.

Definiamo di **ingresso** le variabili con cui dall'esterno si influenza il comportamento del sistema, e di **uscita** le variabili fisiche di interesse per il controllo.

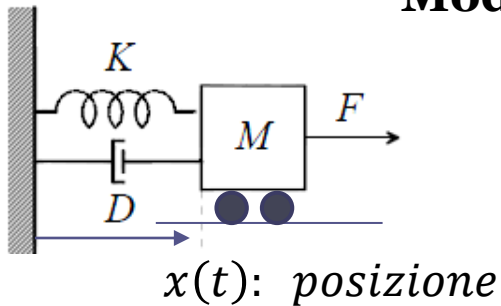
La relazione che sussiste tra variabili di ingresso e di uscita è di **causa-effetto**.

Possono intervenire ingressi non modificabili (**disturbi**), che possono essere misurabili o no

Altre variabili interne al processo che, pur non essendo direttamente quelle verso le quali si rivolge l'obiettivo del controllo, caratterizzano comunque i fenomeni di accumulo e scambio energetico, e quindi il comportamento del processo, vengono dette “**variabili di stato**”

## Sistemi dinamici: esempi

### Sistema «massa-molla-smorzatore» (MMS) con forza esterna applicata



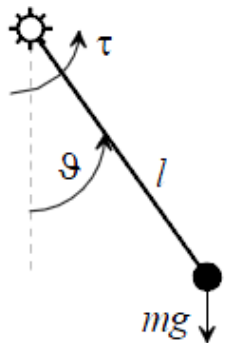
**Modello matematico:**  $M\ddot{x}(t) + D\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t)$

**Ingresso:**  $F(t)$

**Uscita:** ?

**Variabili di stato:**  $x(t), \dot{x}(t)$

### Pendolo su piano verticale con coppia esterna applicata al giunto di cerniera



**Modello matematico:**  $m l^2 \ddot{\theta}(t) + mgl \sin(\theta(t)) = \tau(t)$

**Ingresso:**  $\tau(t)$

**Uscita:** ?

**Variabili di stato:**  $\theta(t), \omega(t)$

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.

**Sistema MMS:** SISO, LTI

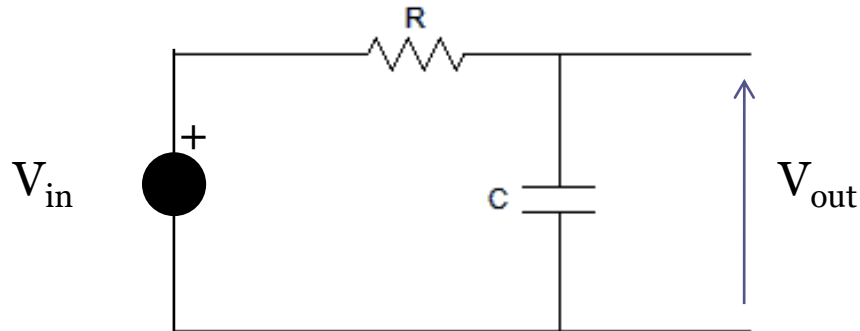
$$M\ddot{x}(t) + D\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t)$$

**Pendolo:** SISO, non lineare

$$m l^2 \dot{\omega}(t) + mgl \sin(\theta(t)) = \tau(t)$$

## Modello matematico di un circuito elettrico

Consideriamo un filtro RC



**Ipotesi di lavoro**

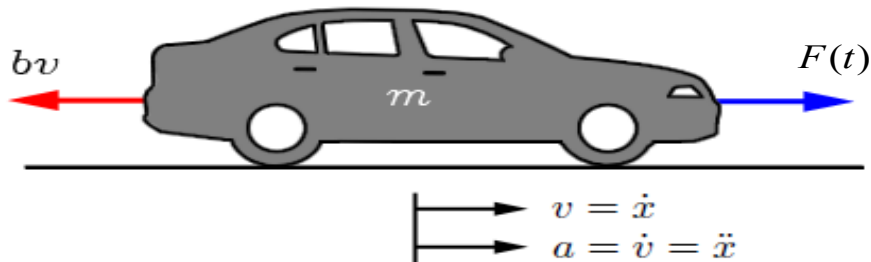
Comportamento lineare della resistenza e del condensatore

**Equazione differenziale**

$$RC \dot{V}_{out}(t) + V_{out}(t) = V_{in}(t)$$



## 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**

Forse di attrito di natura puramente viscosa

**Equazione differenziale**

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

Il circuito elettrico e la dinamica longitudinale del veicolo sono **descritti da due equazioni differenziali formalmente analoghe**

$$RC \dot{V}_{out}(t) + V_{out}(t) = V_{in}(t)$$

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

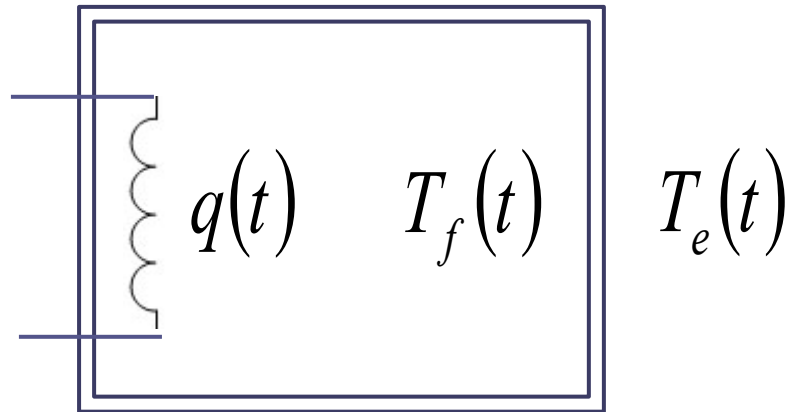
I “ragionamenti” alla base del progetto di un sistema di controllo per questi due sistemi dinamici fra loro diversissimi partono quindi da una base comune:

**i modelli matematici dei due processi sono “identici”**

**“Astrazione”**

## 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



### Ipotesi di lavoro

Comportamento lineare dei fenomeni di accumulo di energia termica nel fluido e scambio termico interno-esterno

Sia  $T_e(t)$  [ $^{\circ}K$ ] la temperatura esterna alla parete,  $T_f(t)$  [ $^{\circ}K$ ] 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.

Legame I/O

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

In cosa differiscono fra loro i modelli matematici del veicolo e del sistema termico ?

$$\begin{array}{lcl}
 m\dot{v}(t) + bv(t) = F(t) & & m\dot{v}(t) + bv(t) = F(t) \\
 C_f\dot{T}_f(t) = q(t) + K_{ie}[T_e(t) - T_f(t)] & \rightarrow & C_f\dot{T}_f(t) + K_{ie}T_f(t) = q(t) + K_{ie}T_e(t)
 \end{array}$$

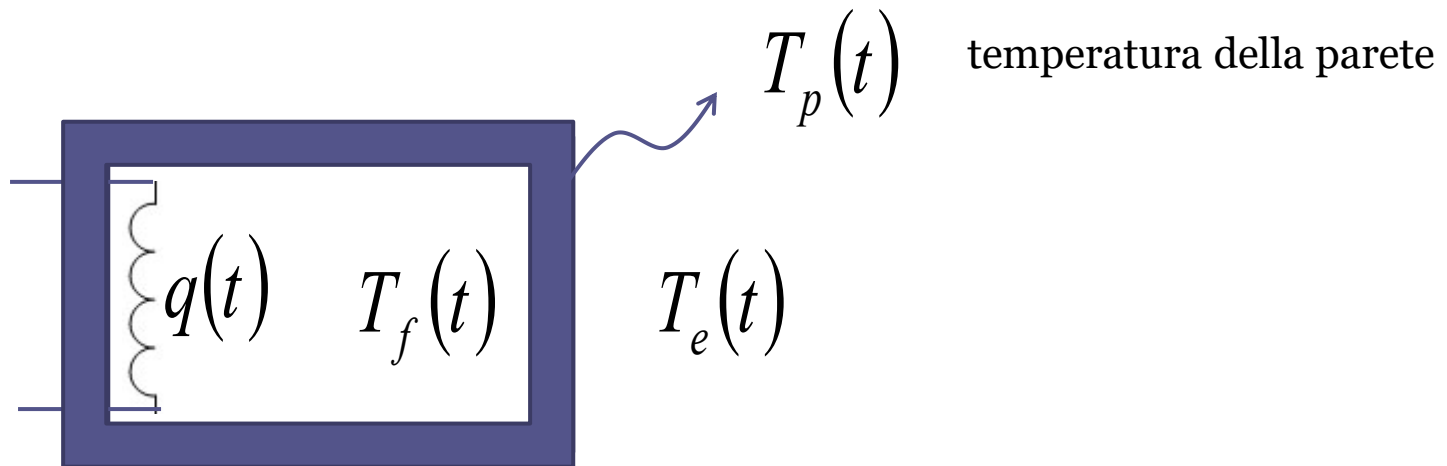
Per comprenderlo, classifichiamo i segnali che intervengono nelle due equazioni differenziali.

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)

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) e anche un **disturbo** (la temperatura ambiente  $T_e(t)$ )

## Complichiamo il modello

Trattiamo in maniera distinta gli accumuli termici nel volume e nella parete di contorno. Definiamo quindi un modello più complesso che mi fornisca 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)

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

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

## 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)

**Misure:** ciò che possiamo misurare (es. posizione ago del tachimetro, lettura goniometro, lettura bussola)

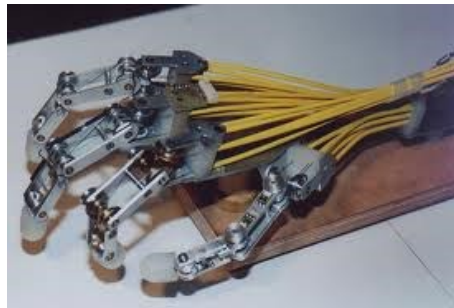
**Parametri:** le "costanti" che appaiono nel modello del sistema (es. la massa, gli attriti, l'elasticità)

### COMPORTAMENTO DESIDERATO

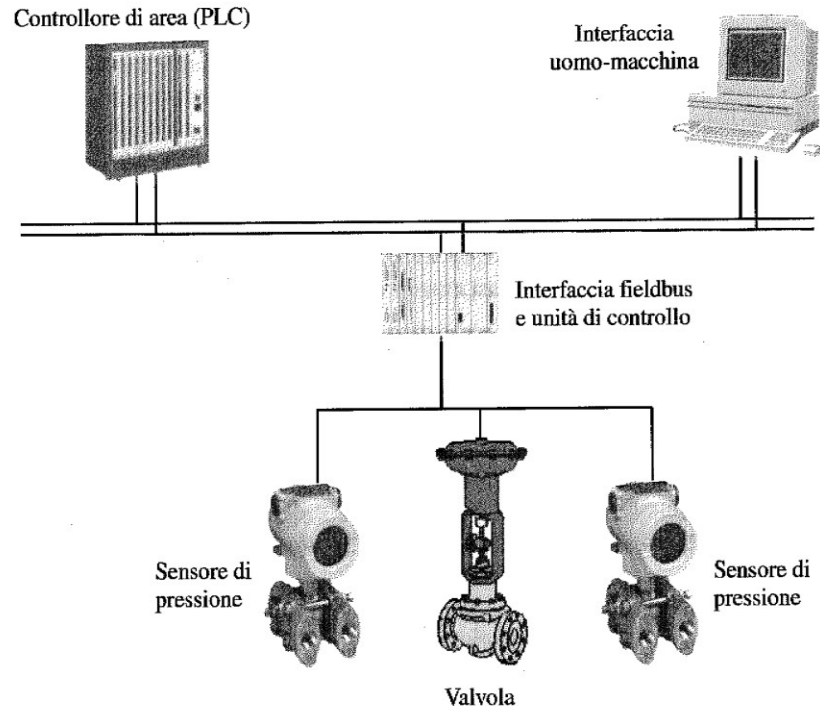
$z(t) \longrightarrow r(t)$  (  $r$  = riferimento = uscita desiderata )

## 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



# COMPONENTI DEI SISTEMI DI CONTROLLO “MODERNI”



## • Componenti base

- Dispositivi di misura (**sensori**)
- Unità di elaborazione (**controllo**)
- Dispositivi di attuazione (**attuatori**)

## • Altri componenti

- Sistemi di **comunicazione** fra unità di controllo, sensori e attuatori
- **Interfaccia uomo-macchina** per interazione con operatore)

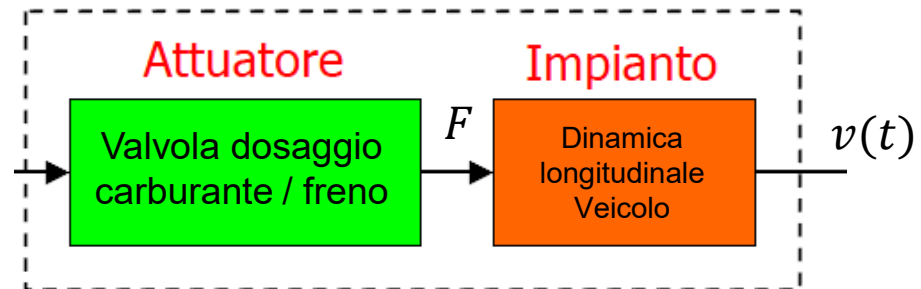


## Struttura tipica di un sistema di controllo

Sistema di Controllo in **Retroazione**

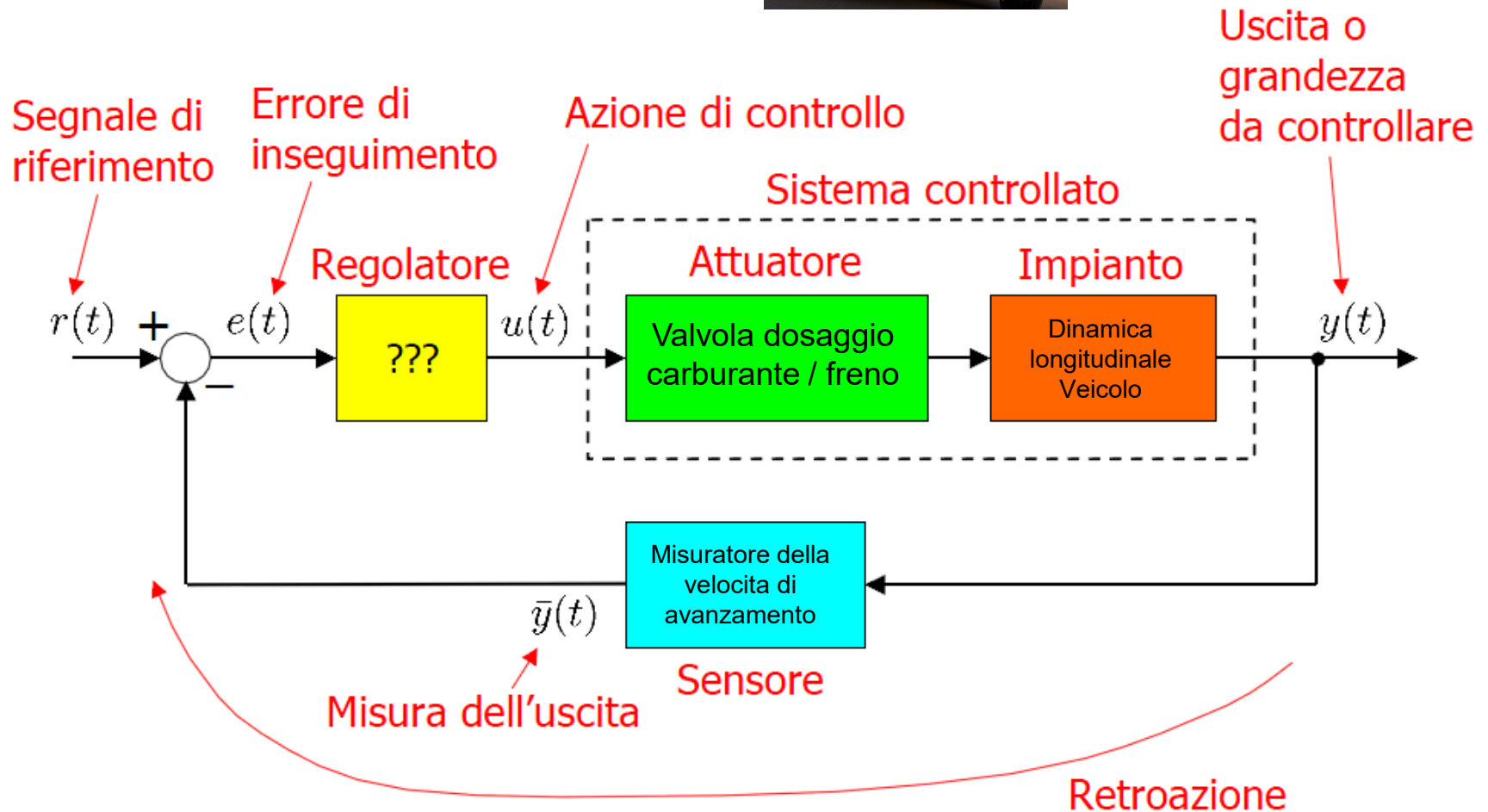
Regolazione della velocità longitudinale di un veicolo (**cruise control**)

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



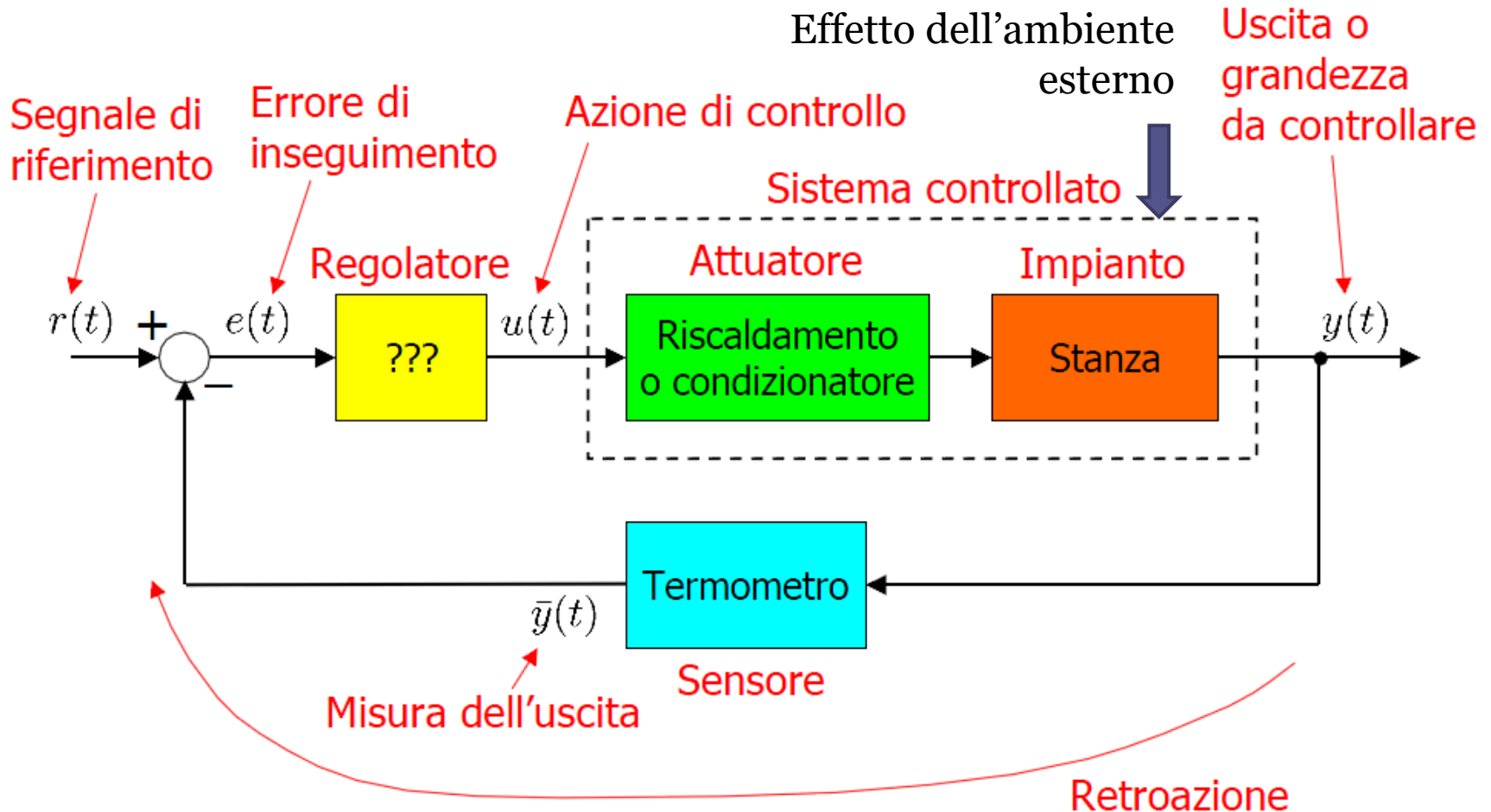
# Struttura tipica di un sistema di controllo in **Retroazione**

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

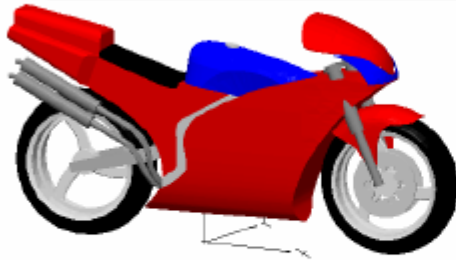


# Struttura tipica di un sistema di controllo in **Retroazione**

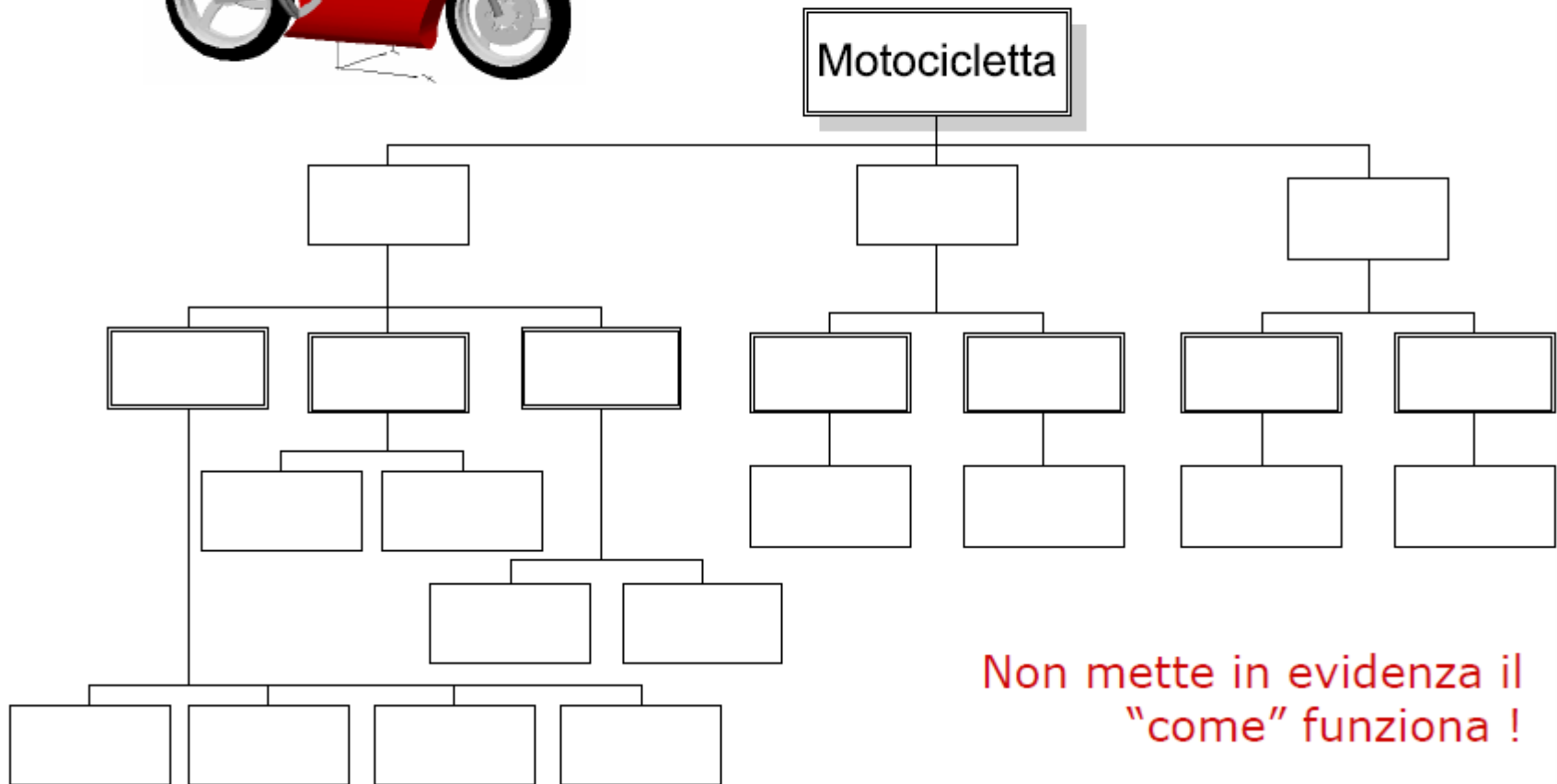
*Regolazione della temperatura in un ambiente*



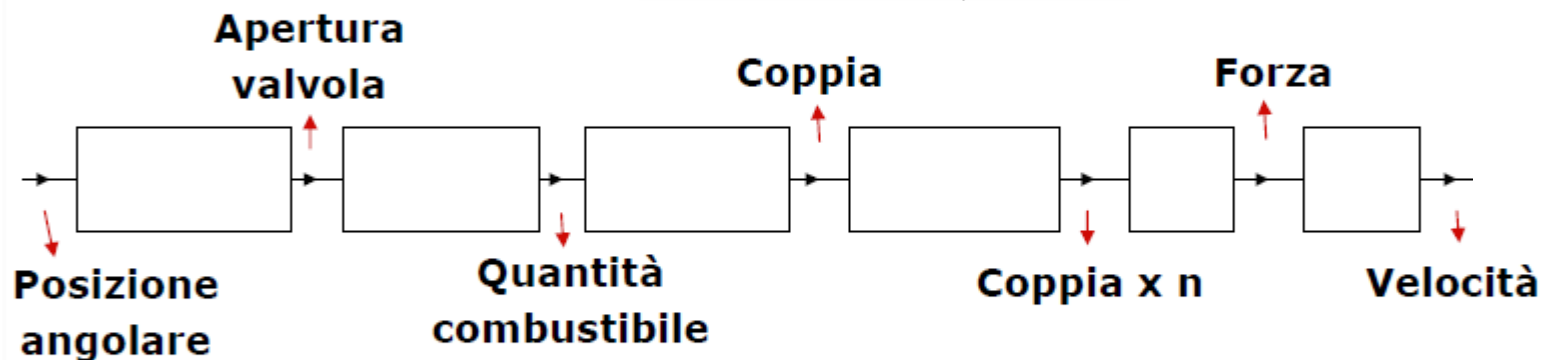
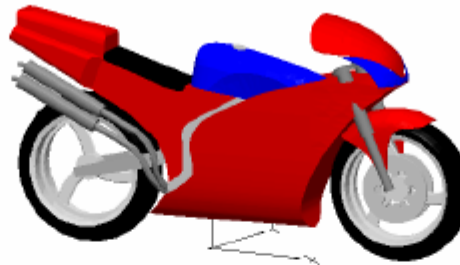
## Decomposizione Gerarchica di un Sistema



Utile per un autoricambi  
Simile al modello di esplorazione del Web

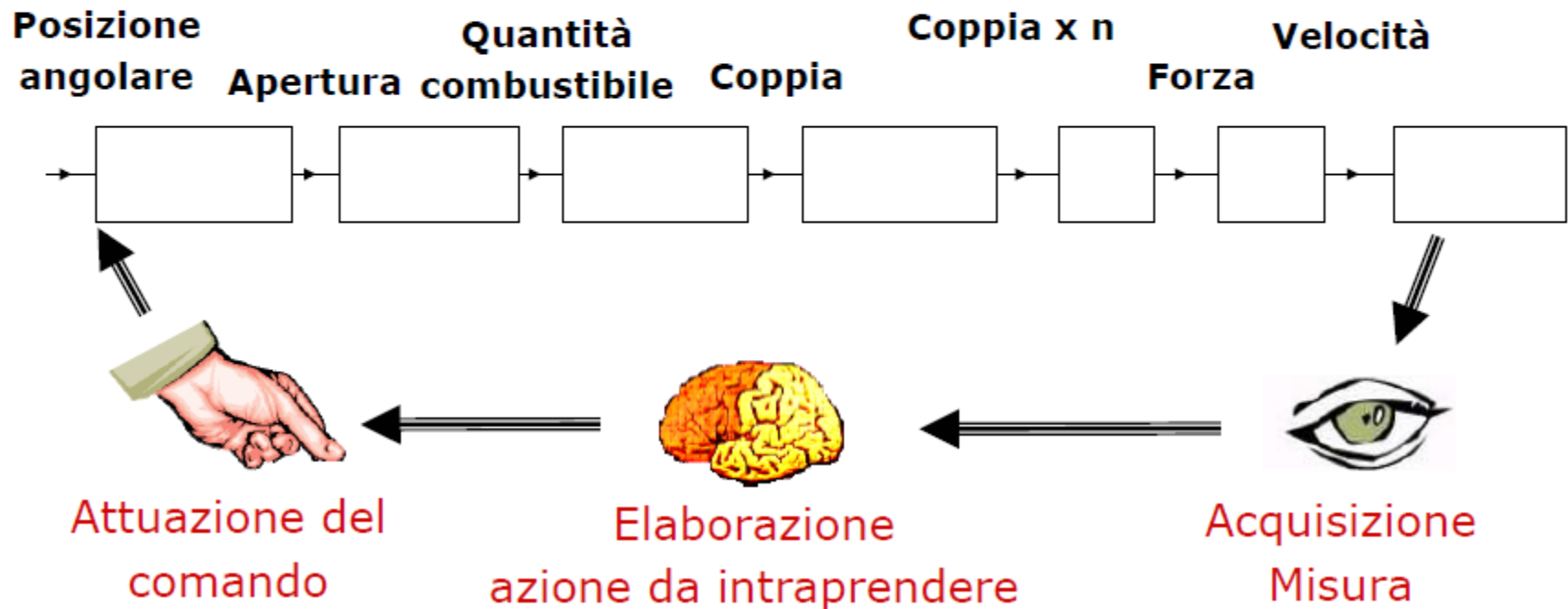
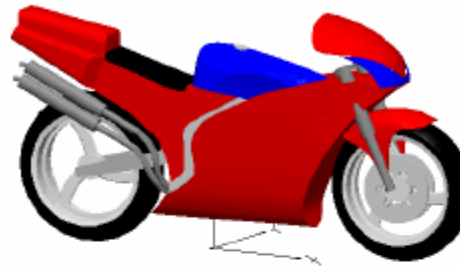


## Decomposizione Funzionale di un Sistema

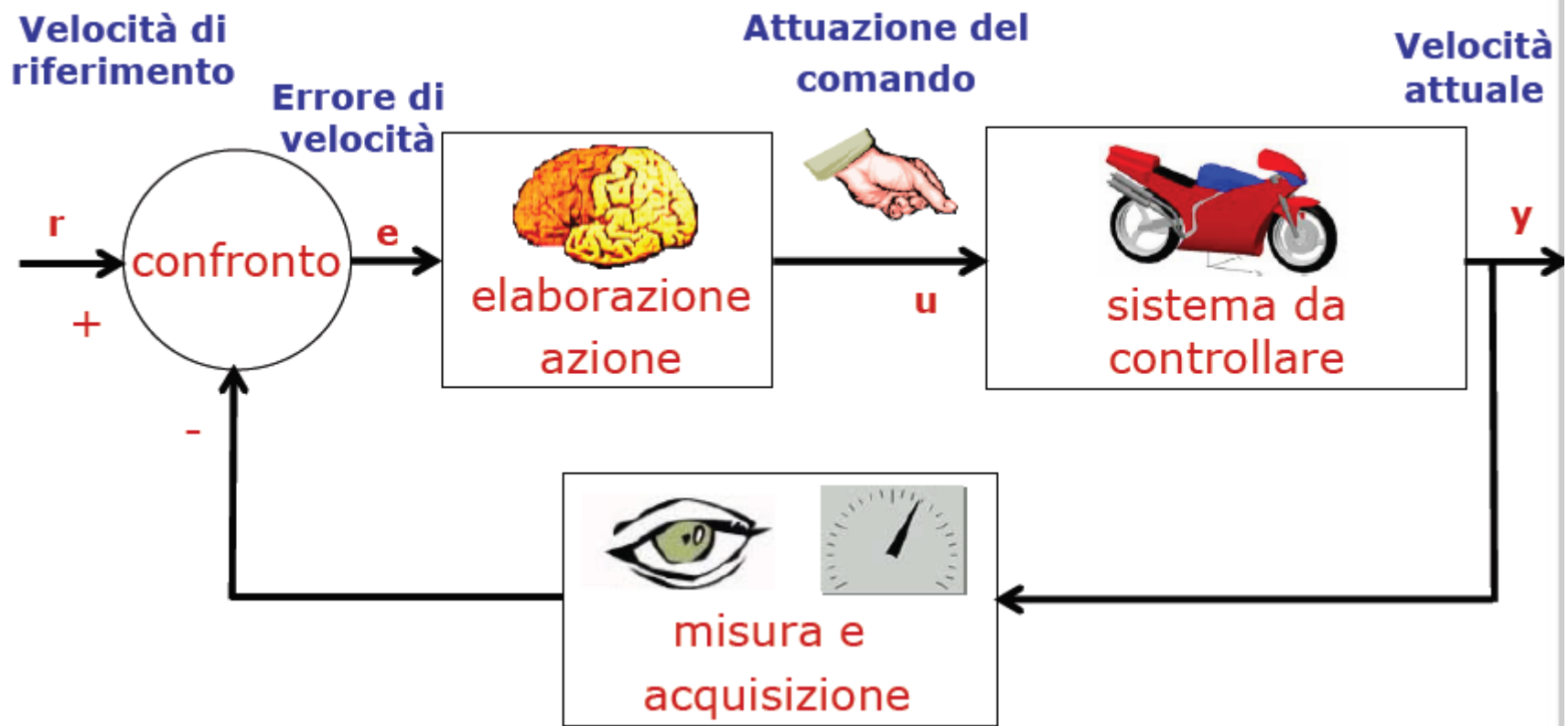


Esprime quelle relazioni di **causa-effetto** a noi necessarie per capire il funzionamento del sistema e per poter intervenire su di esso !

## Controllo manuale della guida

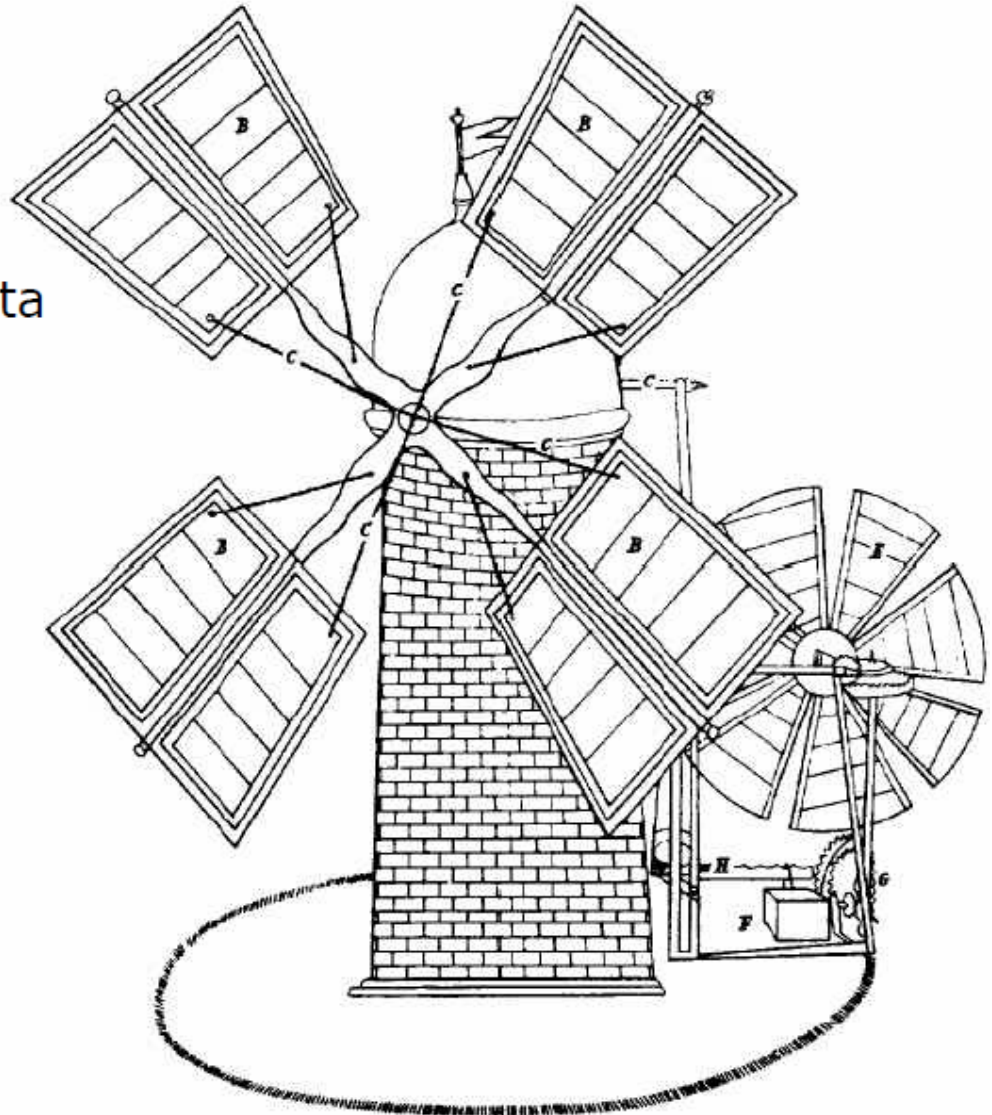
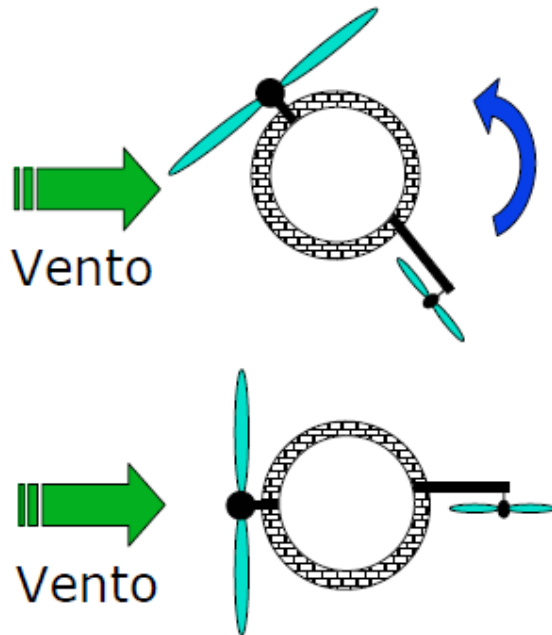


## Schema standard in retroazione



## Un pò di storia: Sistema automatico di puntamento

- E. Lee 1745
- Sistema di puntamento automatico del mulino nella direzione del vento
- La seconda ruota era posta a  $90^\circ$  rispetto a quella principale

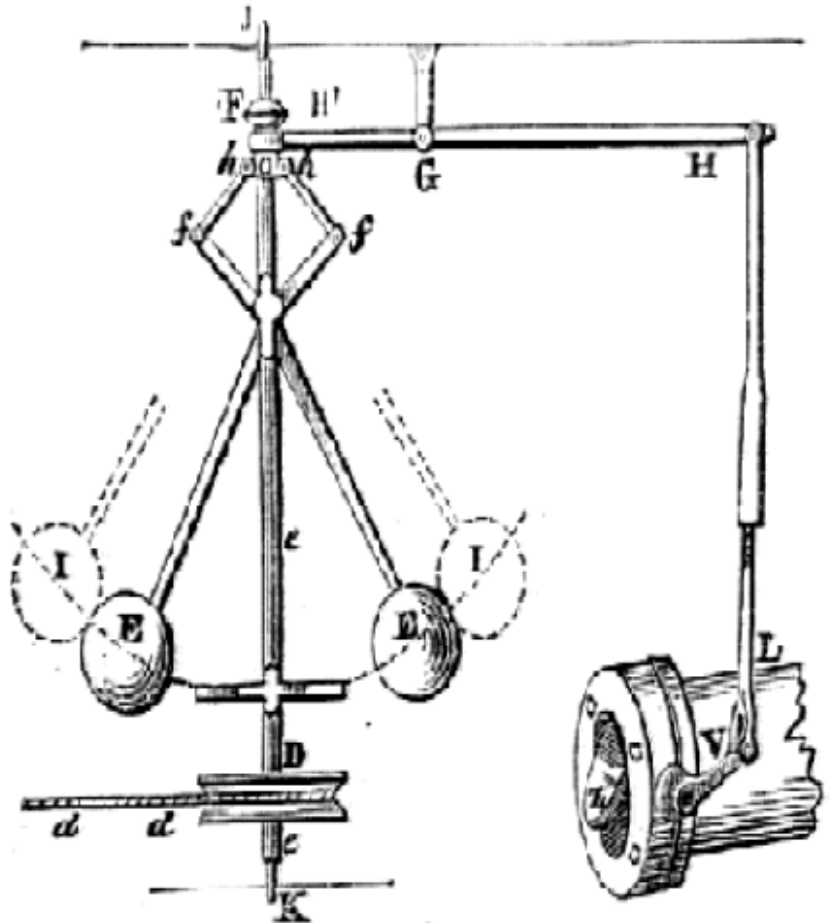




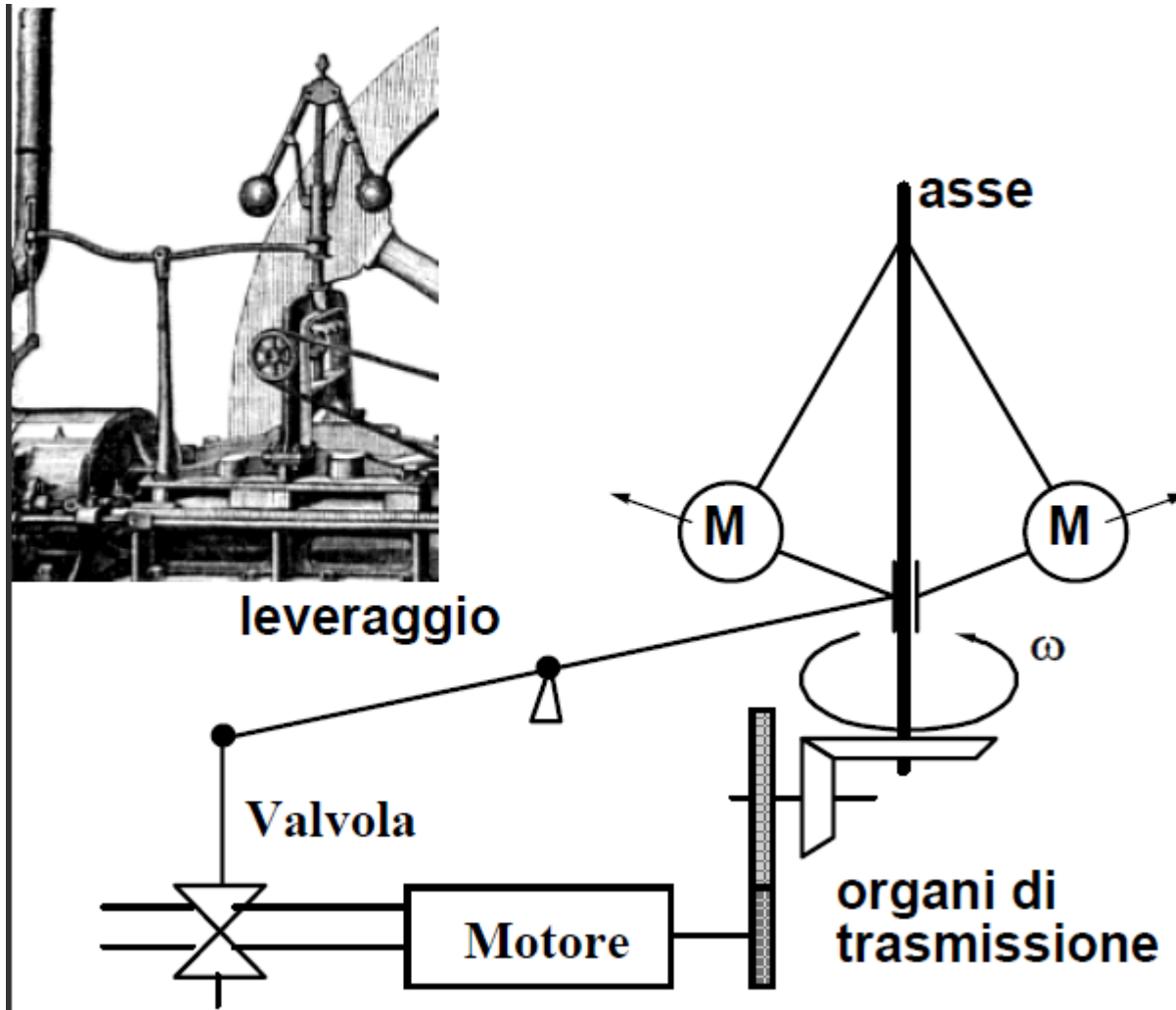
# Regolatore di Watt

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



# Regolatore di Watt



più veloce gira l'asse,

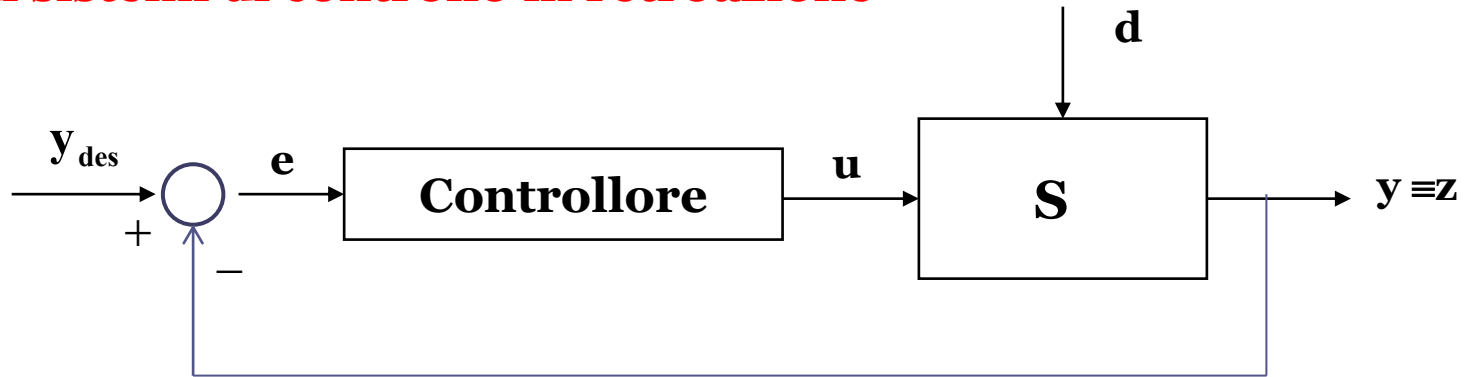
più le masse sono spinte dalla forza centrifuga,

più la valvola si chiuderà,

meno vapore alimenterà il motore,

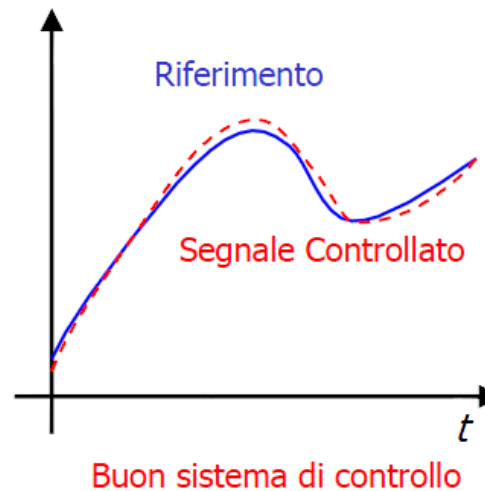
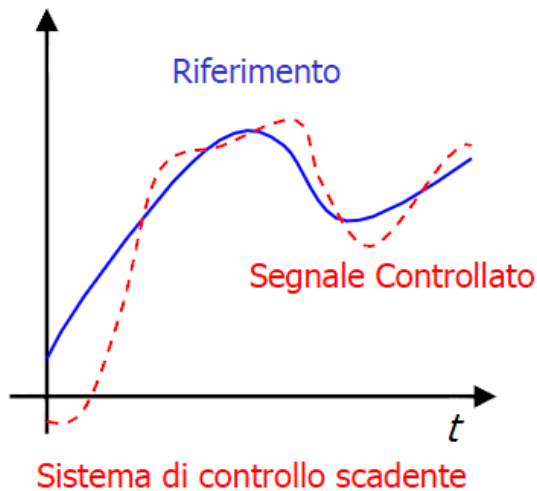
meno velocemente girerà l'asse!

## 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 di funzionamento del processo S



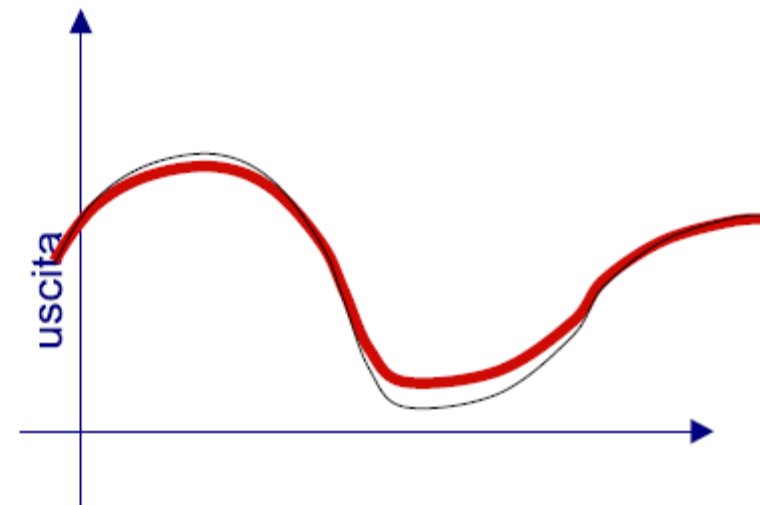
sistemi di **regolazione** vs.  
sistemi di **asservimento**.

## 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)

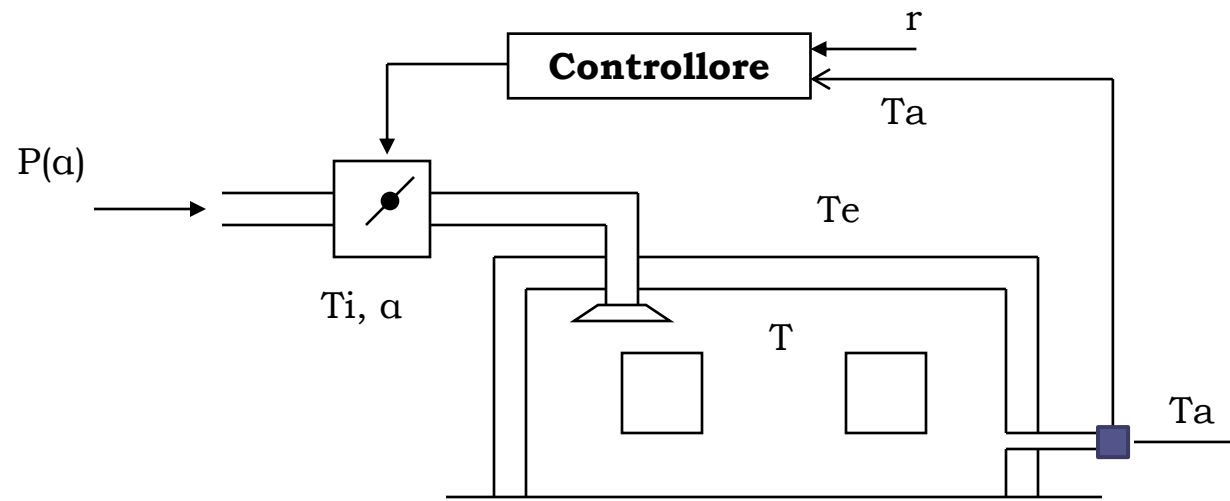


- Controllo del Moto  
(Servomeccanismi)
- La grandezza controllata è una  
variabile di tipo meccanico  
(posizione, velocità)
- Controllo di Processo
- La variabile di uscita  
controllata non è di tipo  
meccanico ma rappresenta  
comunque una grandezza fisica  
(temperatura, pressione,  
tensione, corrente, portata,  
livello, concentrazione)



## ESEMPIO

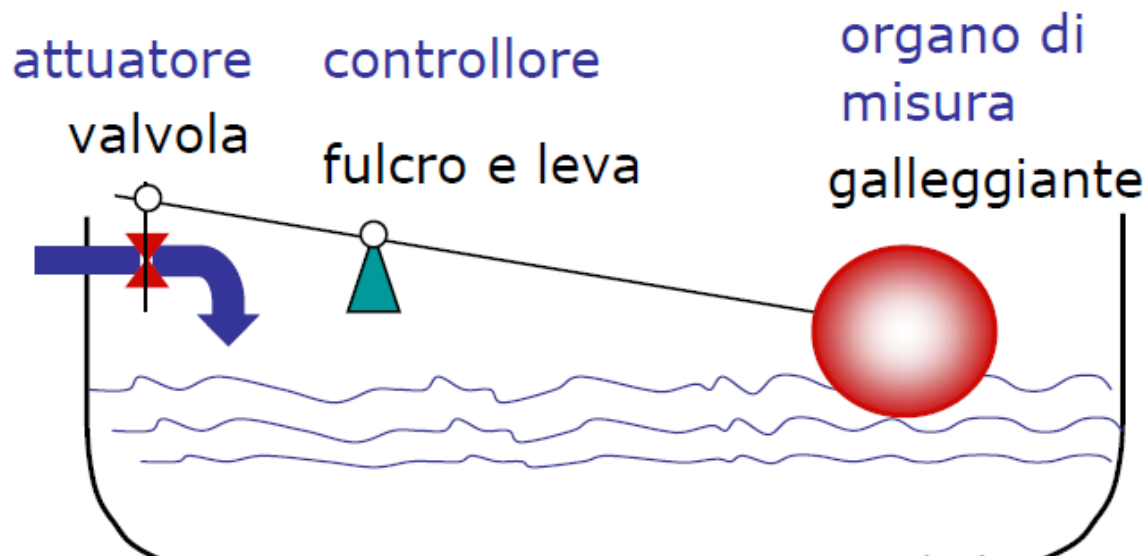
### Regolazione di temperatura in un ambiente



- $z = T$  (temperatura media dell'ambiente)
- $u = \alpha$  (apertura della valvola che regola la portata  $P$  dell'aria immessa a temperatura  $T_i$ )
- $d = T_e$  (temperatura esterna)
- $y = T_a$  (temperatura aria estratta)
- $r = 23^\circ\text{C}$  (temperatura desiderata – set-point)

## ESEMPIO

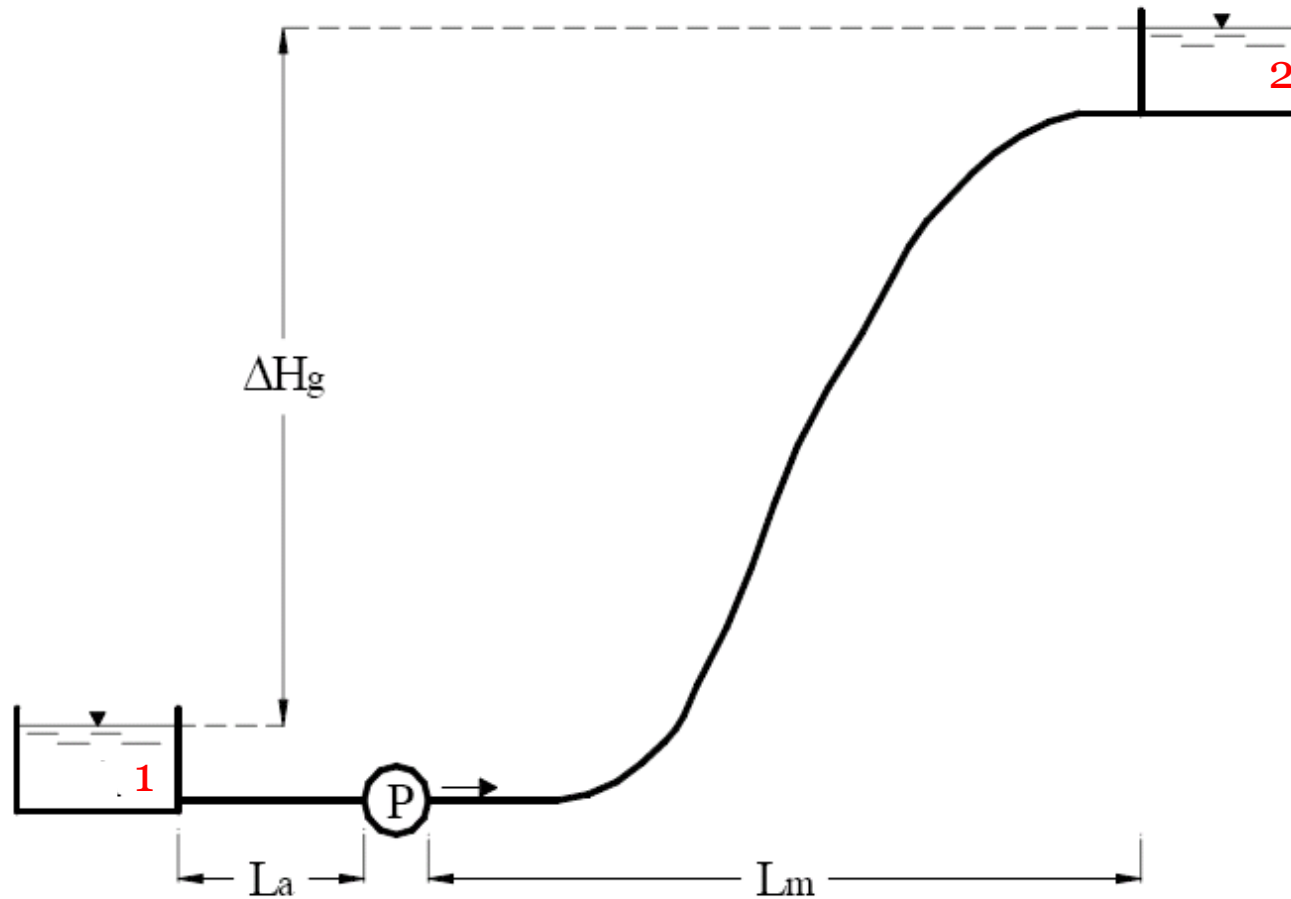
**Tecnologia “meccanica”. Implementazione «analogica» del controllo di livello nella cassetta di scarico di un WC.**



Quando l'acqua raggiunge il livello desiderato, il galleggiante, tramite la leva, chiude la valvola

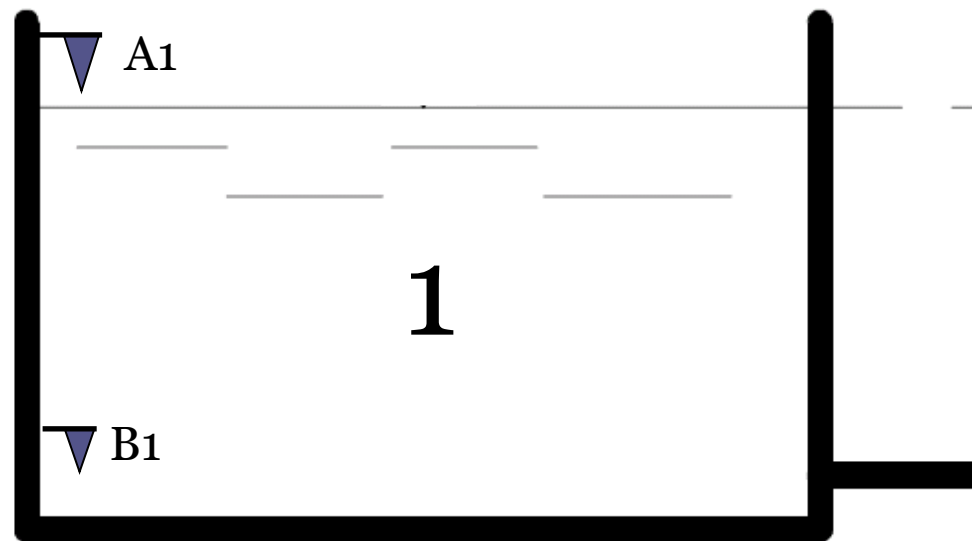
## SISTEMI DI AUTOMAZIONE - ESEMPIO

### Impianto di sollevamento



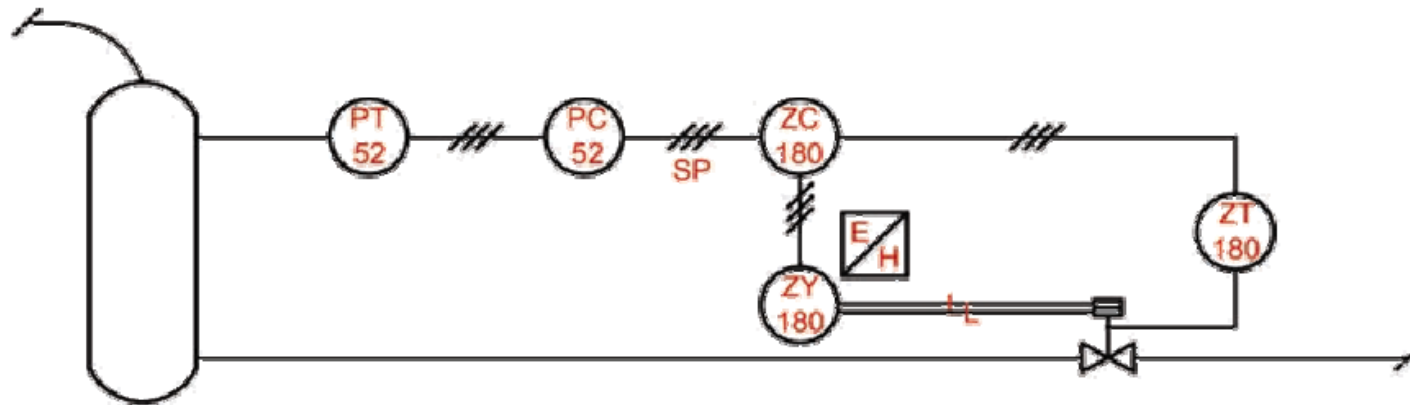


Si controlla la marcia e l'arresto della pompa utilizzando tipicamente misure ON/OFF di livello nei serbatoi.



Logiche di controllo “booleane” (PLC)

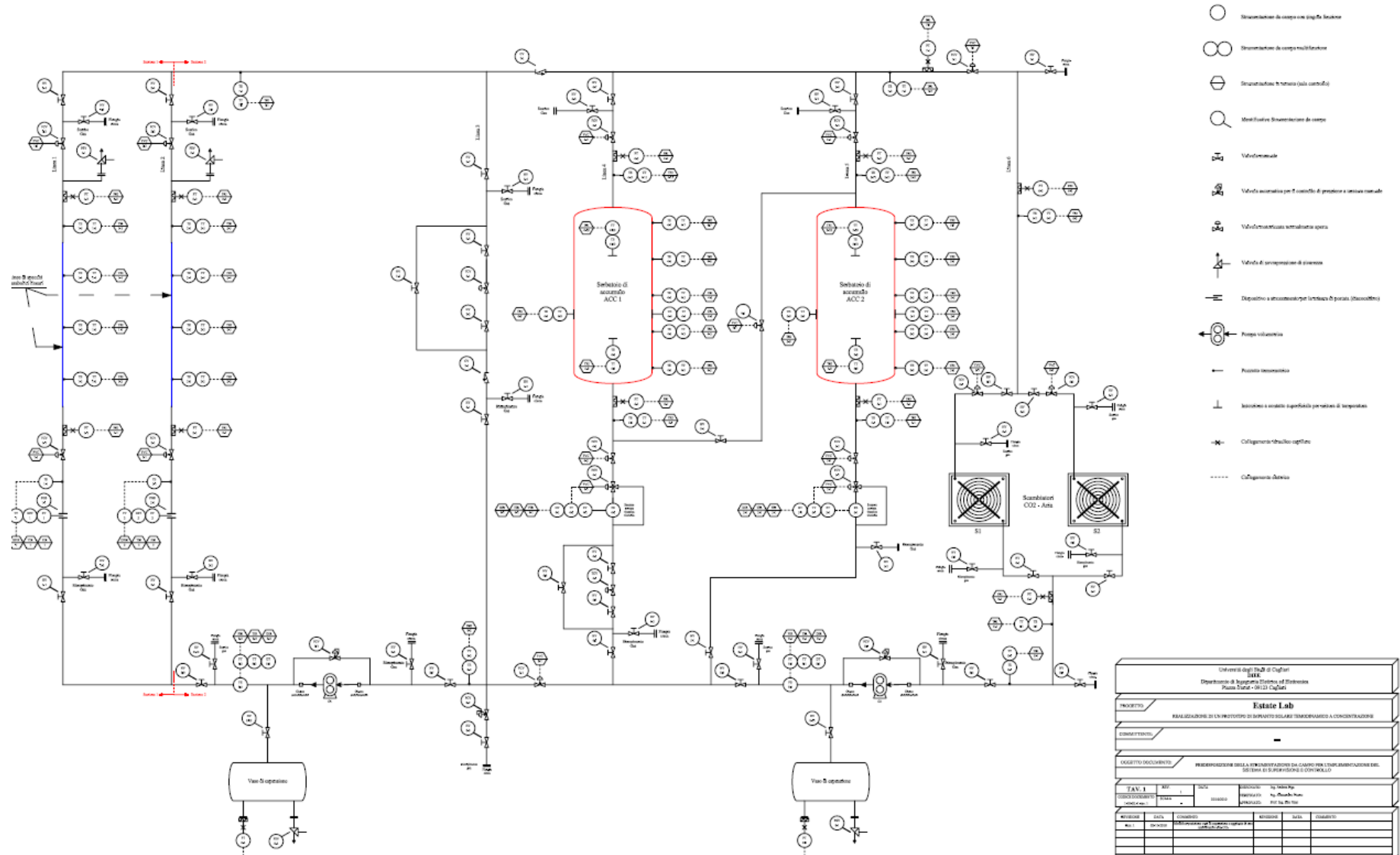
## Rappresentazione dei sistemi di controllo: i diagrammi P&I

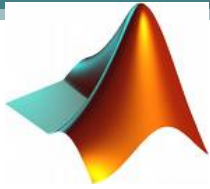


- I diagrammi **Piping and Instrumentation** sono il formalismo più usato per la specifica e documentazione di un sistema di misura e controllo di processo
- I simboli utilizzati sono definiti nello standard ANSI/ISA 55.1-1984 (**Standards and recommended practices for instrumentation and control**)

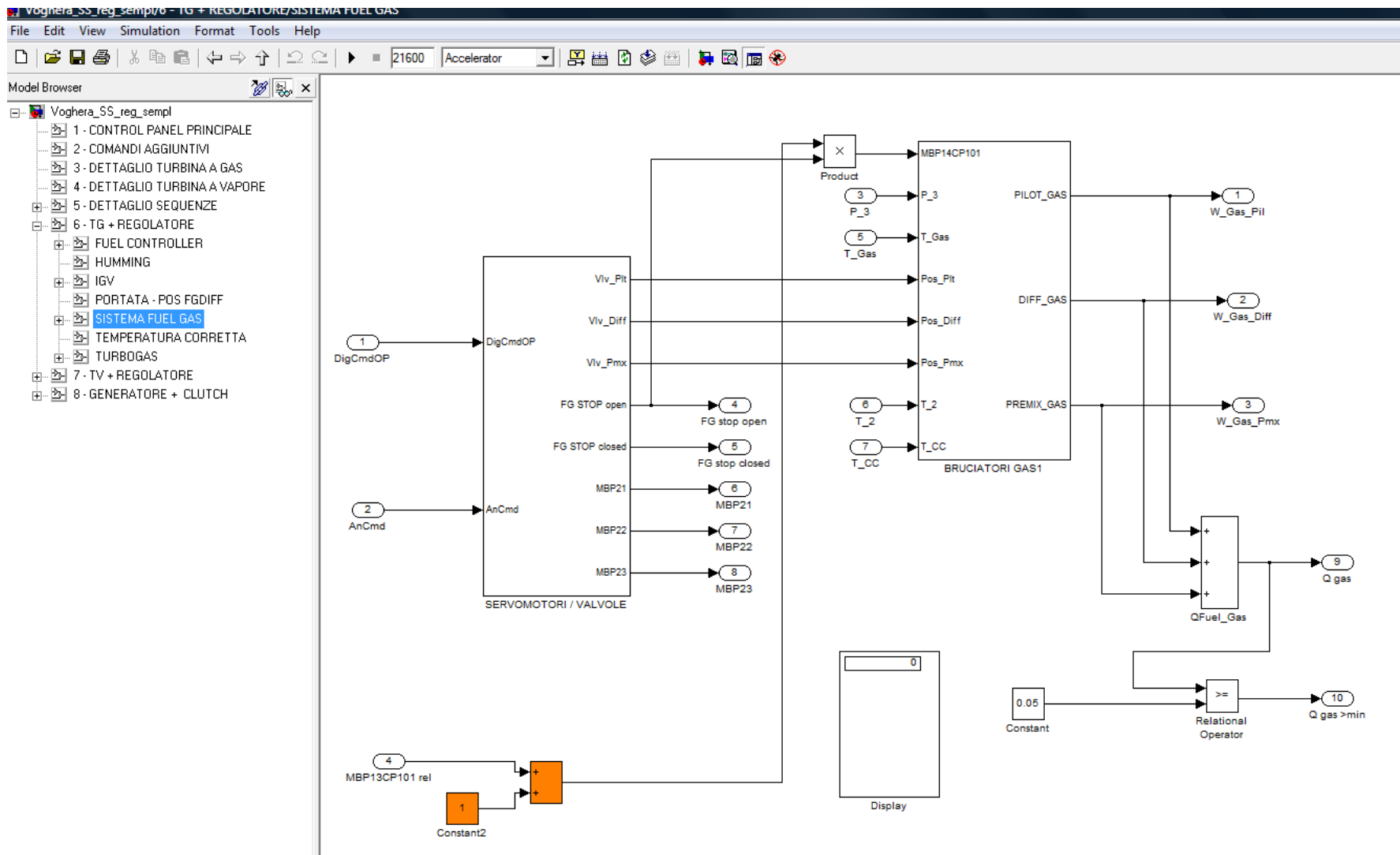
# Impianto solare termodinamico

## Diagramma P&I





# SIMULAZIONE DINAMICA - MATLAB-SIMULINK



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



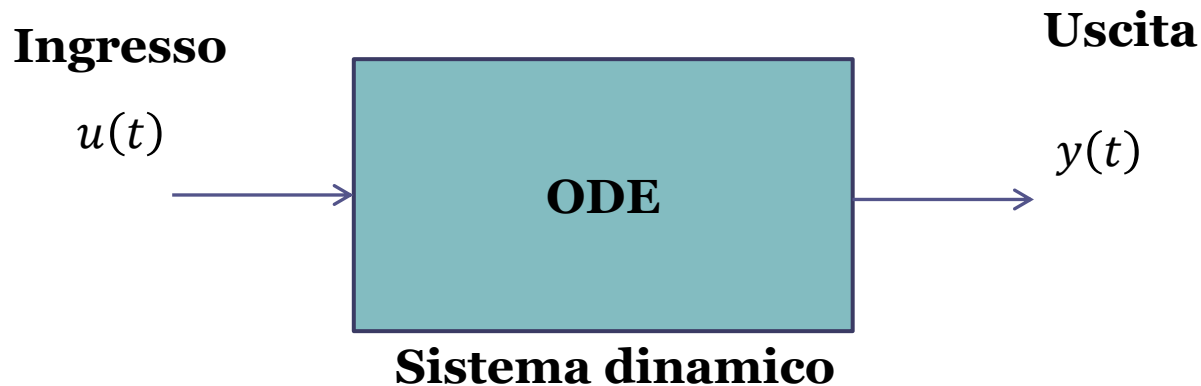
Dal prompt di Matlab:

**vrmaglev**

## Ulteriori generalità ed esempi

Ci occupiamo nel corso di progettare sistemi di controllo per processi descritti da equazioni differenziali ordinarie (ODE) a coefficienti costanti (sistemi LTI)

Considereremo quasi esclusivamente sistemi aventi **ingresso e uscita scalare** (sistemi **SISO**)



$y(t)$  è una variabile fisica (ad es. una temperatura, un livello, una posizione ...) di cui si desidera governare («controllare») il comportamento. Si vuole, ad esempio, che tale variabile assuma un certo valore costante desiderato (che viene detto «set-point»).



Come possiamo fare in modo che la variabile di uscita si comporti nel modo desiderato ?

Possiamo agire sulla variabile di ingresso  $u(t)$ , che è una variabile manipolabile che influisce sul comportamento dell'uscita. L'evoluzione temporale della variabile di ingresso può essere scelta arbitrariamente (**entro certi limiti**, nei casi reali esistono ad esempio dei valori minimi e massimi che non possono essere superati, causati dal dimensionamento delle apparecchiature).

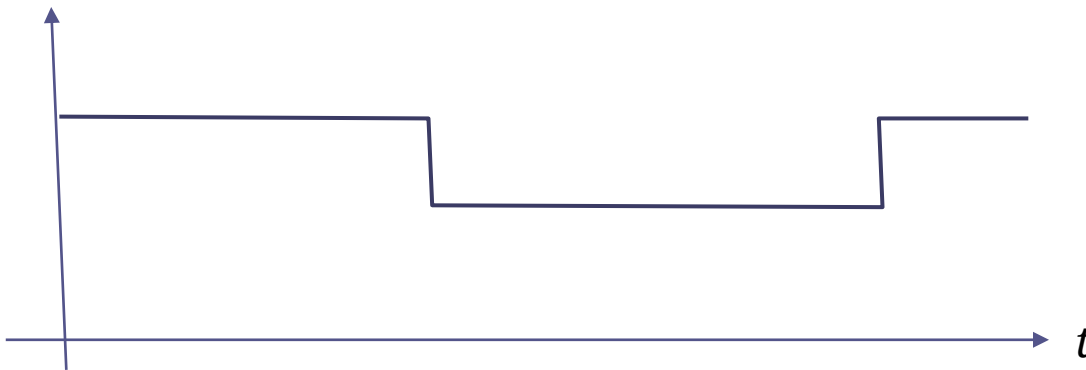
Si deve determinare un profilo per la variabile di ingresso («**legge di controllo**») che faccia sì che la variabile di uscita esibisca il comportamento voluto.

Da un punto di vista matematico si desidera individuare una legge di controllo  $u(t)$  tale da garantire che

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_{des}(t)] = 0$$

in cui  $y_{des}(t)$ , detto set-point, rappresenta il profilo «desiderato» per l'uscita  $y(t)$ . In numerosi casi pratici, soprattutto nell'industria di processo,  $y_{des}(t)$  è un segnale costante, o costante a tratti.

$y_{des}(t)$                       Esempio di segnale costante a tratti



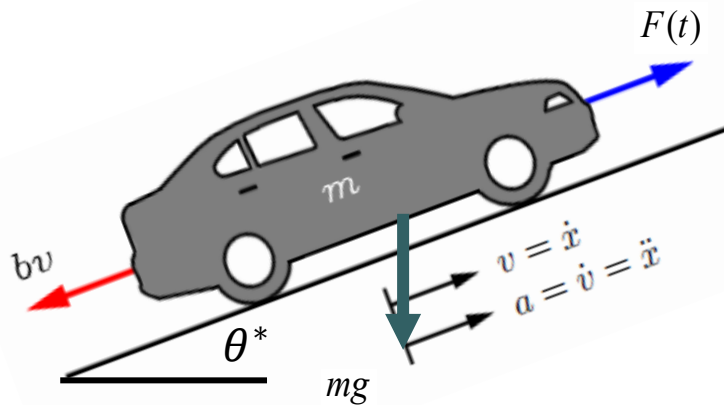


Come già detto, il passo preliminare al progetto di un sistema di controllo è **individuare e caratterizzare il modello matematico del processo**, cioè le equazioni che definiscono il modo in cui la variabile di uscita sia influenzata dalla variabile di ingresso.

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 forza applicata al veicolo nell'interfaccia tra il pneumatico e la carreggiata. Ipotizziamo di poter imporre un profilo arbitrario di forza applicata  $F(t)$  (**attuatore ideale**). **E' una ipotesi plausibile?**

La forza resistente  $bv$ , 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".

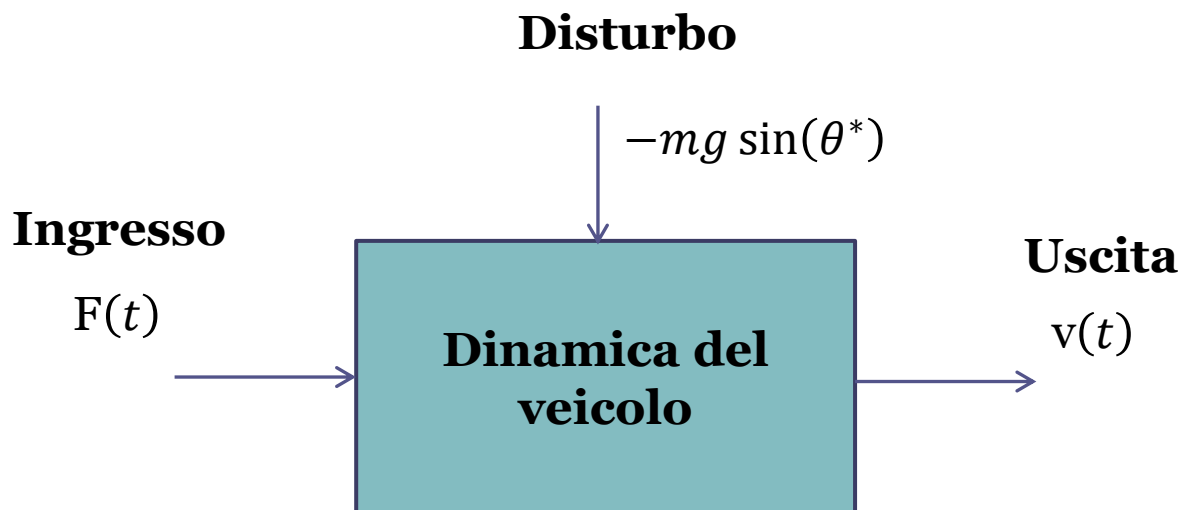
L'equazione differenziale che modella il sistema in esame è la seguente

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

**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:

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



Componente che  
compensa la forza peso



Componente che compensa la forza di  
attrito viscoso che si oppone al moto alla  
velocità desiderata  $V_{des}$

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 l'espressione della spinta  $F(t)$  e risolviamola !

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

Eq. differenziale del sistema

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

Legge di controllo

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

Per poterla risolvere in modo più agevole, introduciamo una nuova variabile

$$e_v(t) = v(t) - V_{des} \quad \text{errore fra l'uscita ed il set-point}$$

Se mostriamo che l'errore tende a zero ne risulta, come conseguenza, che la velocità tende al valore desiderato

$$v(t) = e_v(t) + V_{des}$$

$$\dot{v}(t) = \dot{e}_v(t)$$

Sostituendo si ottiene:  $m\dot{e}_v(t) + be_v(t) = 0$

$$\dot{e}_v(t) + \frac{b}{m}e_v(t) = 0$$



$$e_v(t) = e_v(0)e^{-\frac{b}{m}t}$$

Poiché i coefficienti  $b$  ed  $m$  sono per definizione positivi, la funzione  $e_v(t) = e_v(0)e^{-\frac{b}{m}t}$  tende esponenzialmente a zero con una rapidità di estinzione del transitorio che dipende dal rapporto  $\frac{b}{m}$  (maggiore è tale rapporto, più rapidamente il segnale tende ad estinguersi).

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»

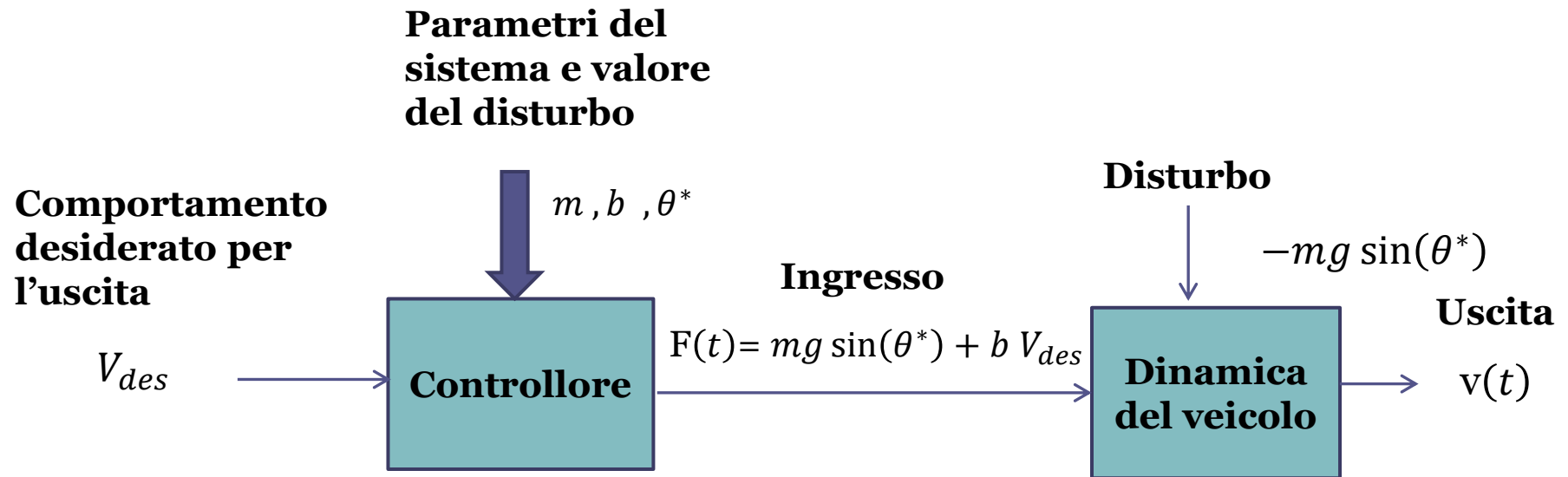
$$F(t) = mg \sin(\theta^*) + b V_{des}$$

**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, richiede un'attesa di 30 minuti prima che questa sia raggiunta)

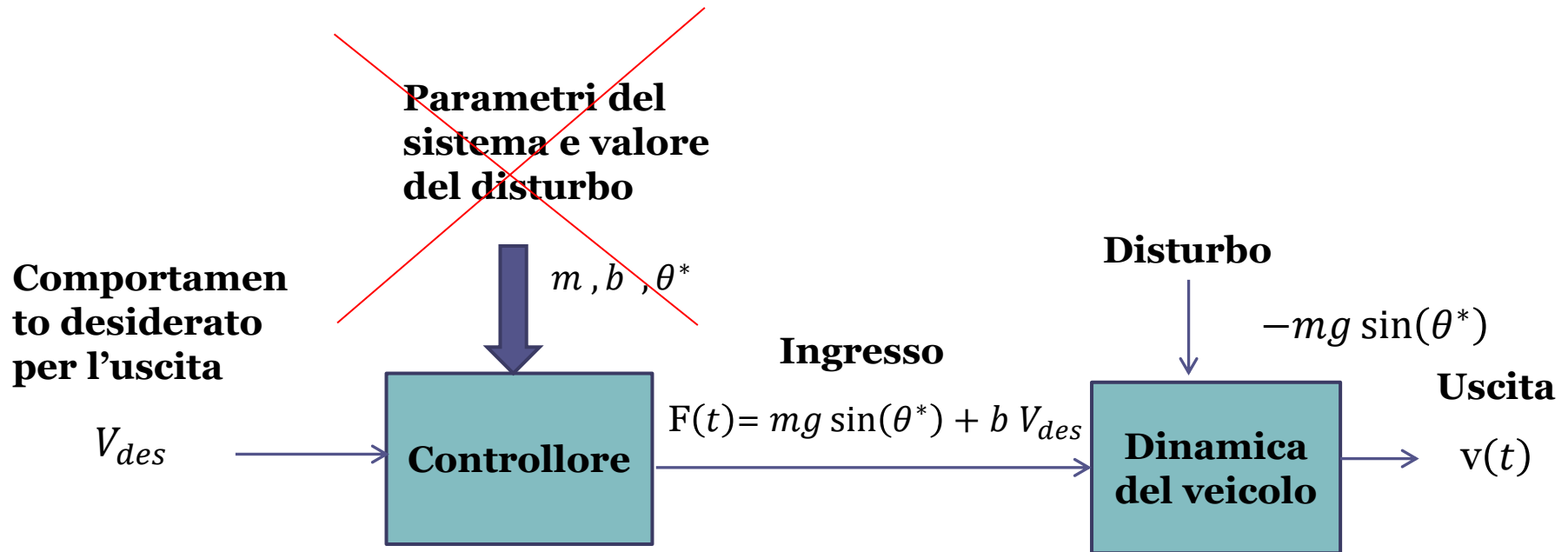
Cerchiamo di capire perché questo improbabile sistema di controllo soffre di tutti questi problemi. Rappresentiamone graficamente la struttura per poterlo «catalogare»



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»)



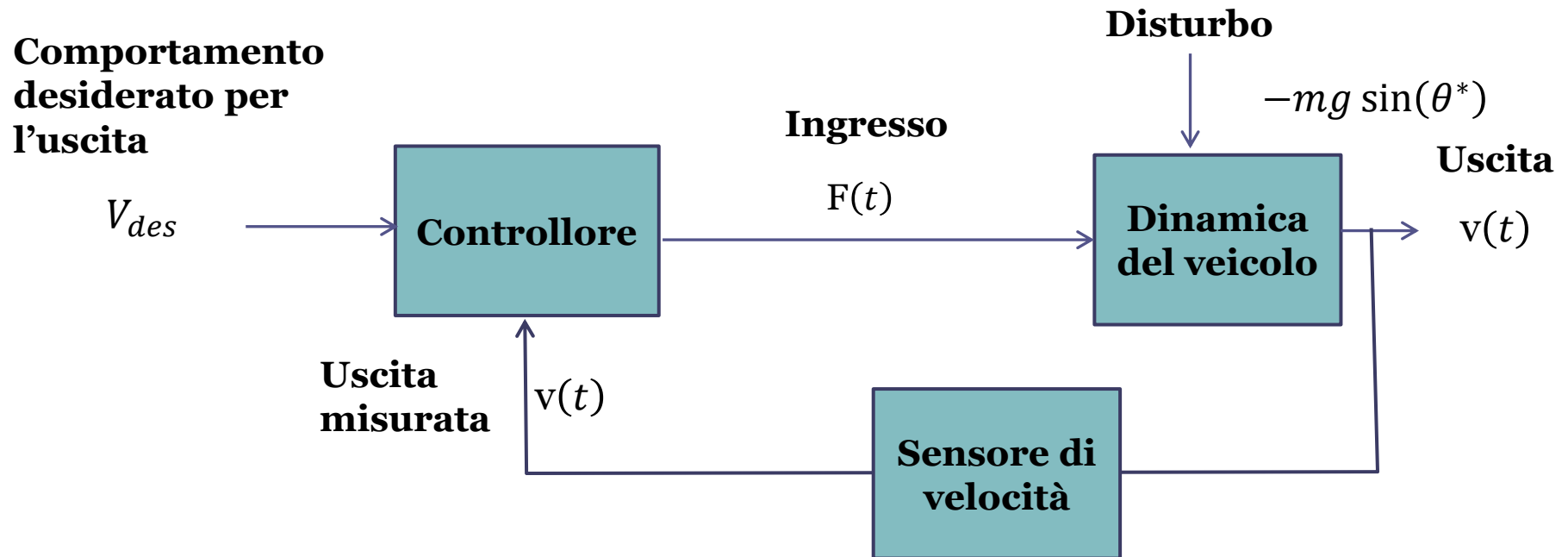
Come deve essere strutturato, da un punto di vista «architeturale», un controllo in retroazione che possa fornire delle prestazioni migliori ?



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

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

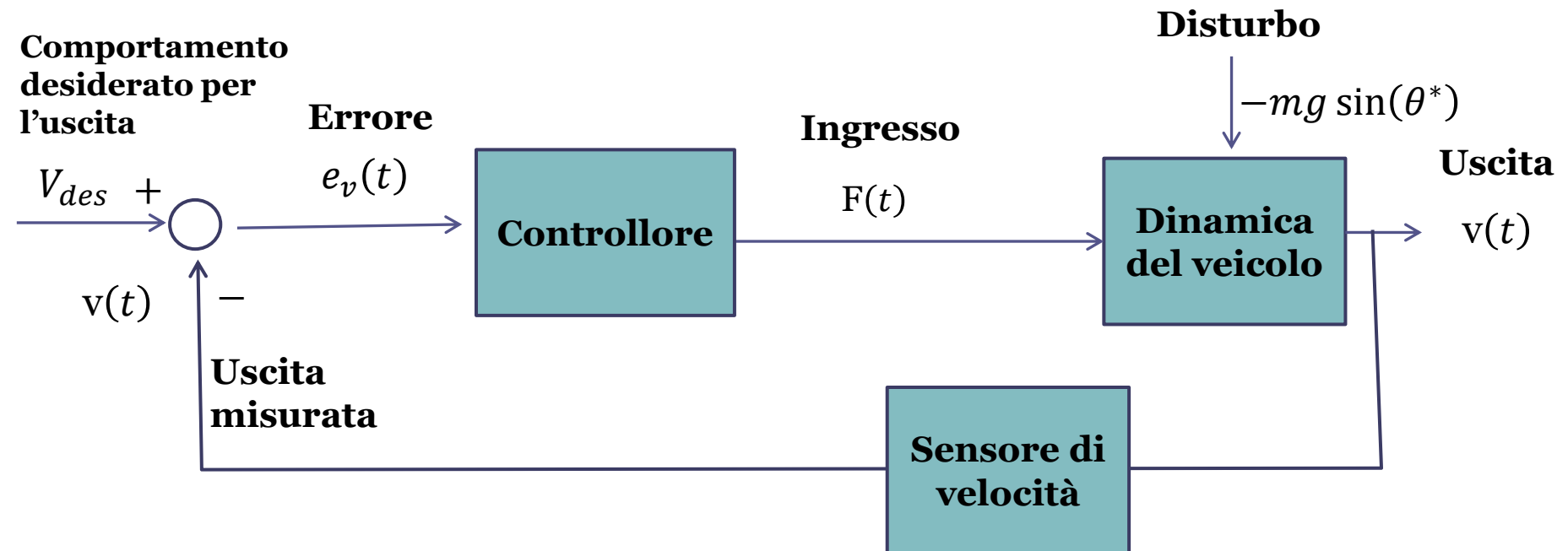
In secondo luogo, **il controllore deve avere accesso, istante per istante, alla misura della velocità** per poter effettuare una pianificazione più accurata del profilo di spinta da applicare al veicolo



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

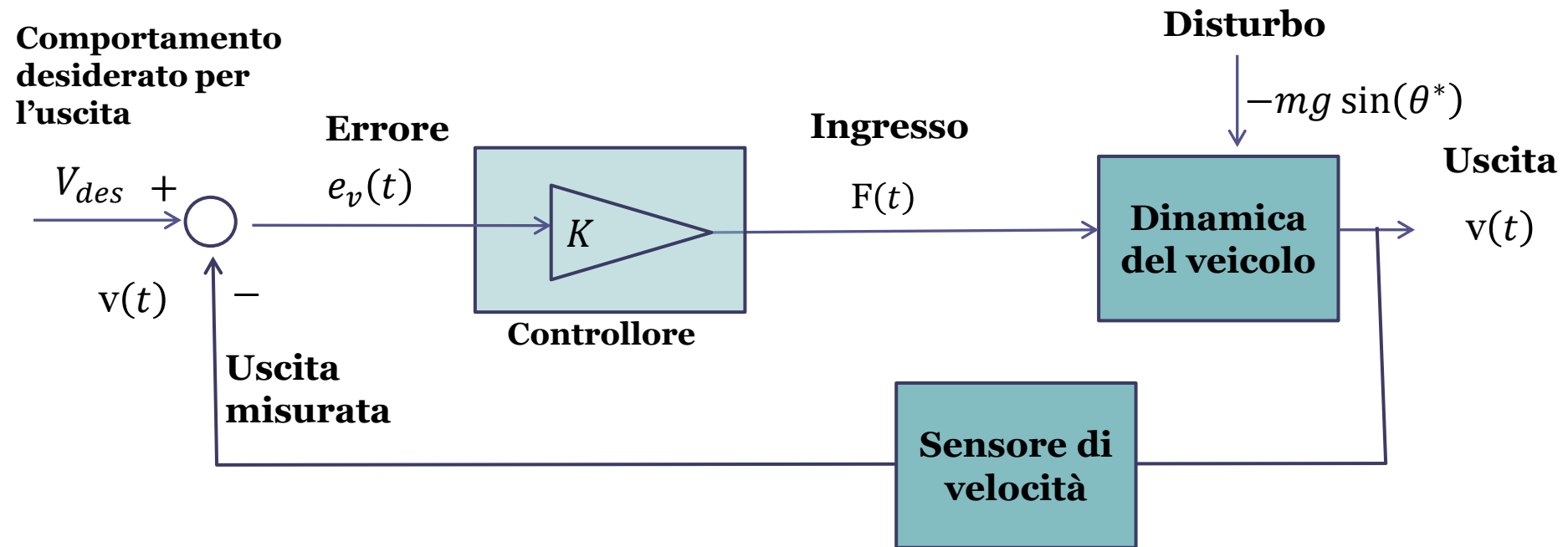
Proviamo ad ipotizzare, ed analizzare, possibili strutture per la legge di controllo in retroazione.

Appare ragionevole che **il controllore elabori il segnale di errore**, in modo da accedere ad una chiara informazione in merito al fatto che il veicolo debba essere accelerato o rallentato, ed in che misura.



Si potrebbe ragionevolmente ipotizzare una soluzione in cui la spinta applicata al veicolo sia direttamente proporzionale all'errore

$$F(t) = K[V_{des} - v(t)] = K e_v(t)$$



Una legge di controllo di questo tipo, che in taluni casi si applica con profitto, chiamerebbe «**controllore proporzionale**». **Può funzionare in questa applicazione ?**

Serve qualcosa di più sofisticato rispetto ad una legge di controllo di tipo proporzionale. Una legge di controllo in grado di risolvere brillantemente questo problema è la seguente:

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

E' una generalizzazione della legge di controllo proporzionale che vede la presenza di una componente aggiuntiva, proporzionale non all'errore di velocità ma bensì al suo integrale.

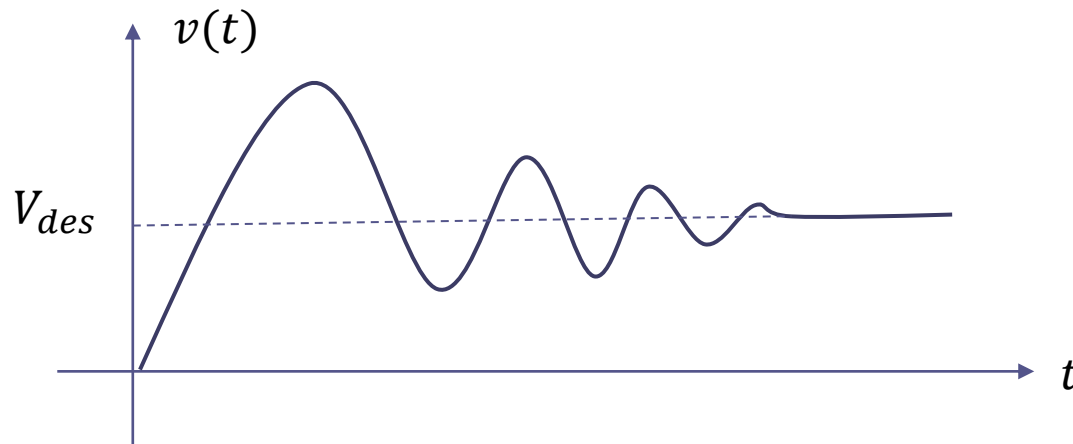
La legge di controllo presentata sopra è l'algoritmo che trova maggiori applicazioni nella realtà industriale. Si stima che oltre l'80% degli anelli di controllo sia realizzato impiegando tale algoritmo (in forme variamente modificate).

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.

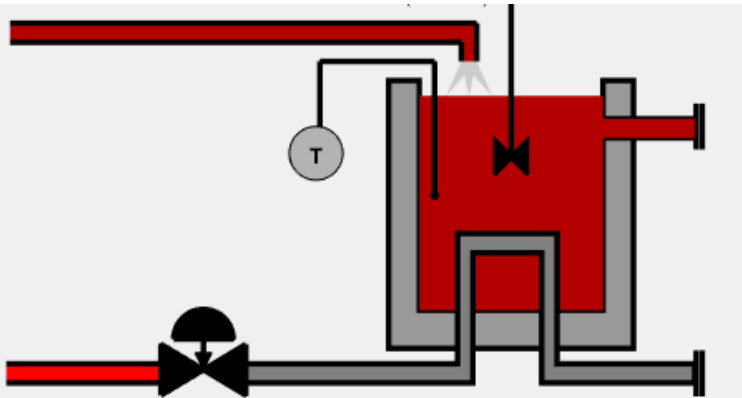
Ciò che mostreremo è che il controllore proposto garantisce che qualunque valore positivo si attribuisca ai suoi due guadagni il valore di regime della velocità del veicolo coincide con quello desiderato.

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 per quanto concerne l'assenza di fenomeni transitori indesiderati quali ad esempio oscillazioni.



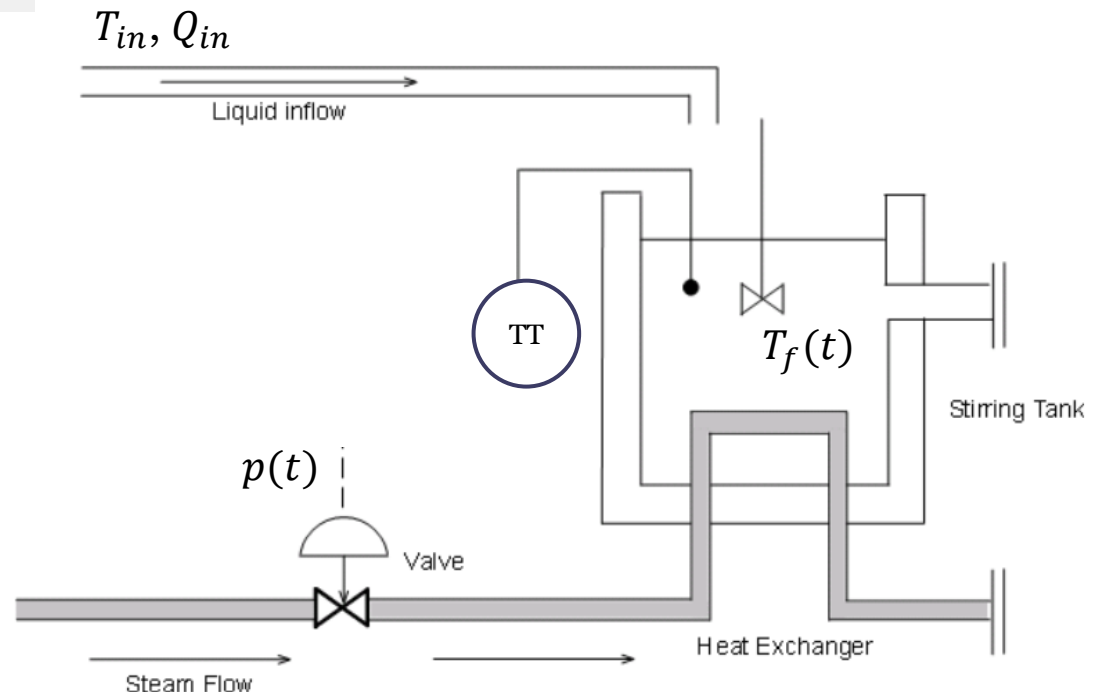
*Sarebbe accettabile in un veicolo commerciale un comportamento come quello evidenziato nella curva a sinistra ?*

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



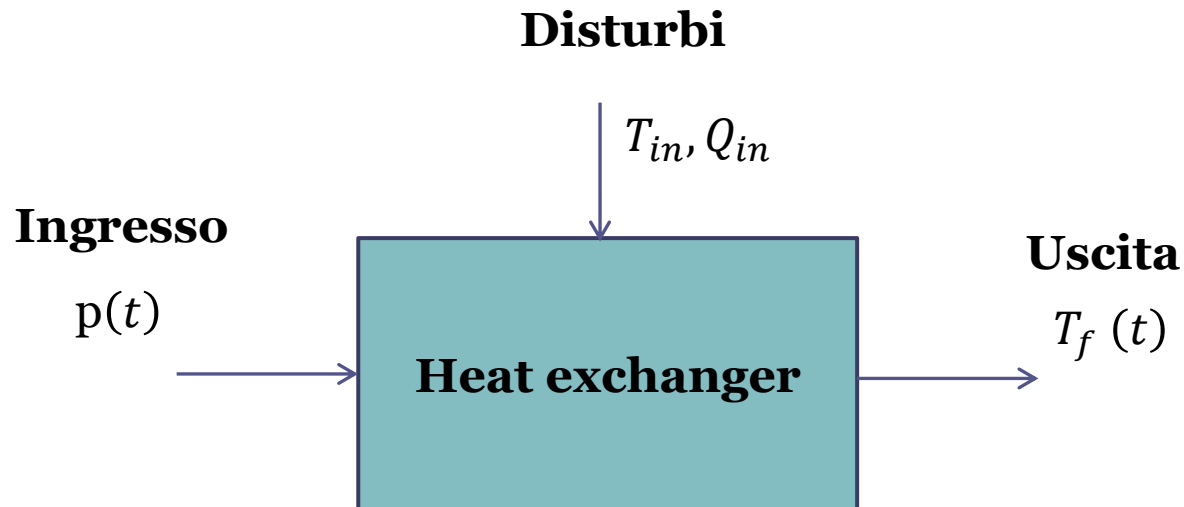
Un liquido a temperatura  $T_{in}$  viene immesso con portata  $Q_{in}$  in un serbatoio all'interno del quale deve essere riscaldato ad una temperatura  $T_{des}$  prima di essere pompato altrove. Nel serbatoio transita una conduttura percorsa da vapore ad alta temperatura.

Il processo è attuato per mezzo di una servovalvola 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



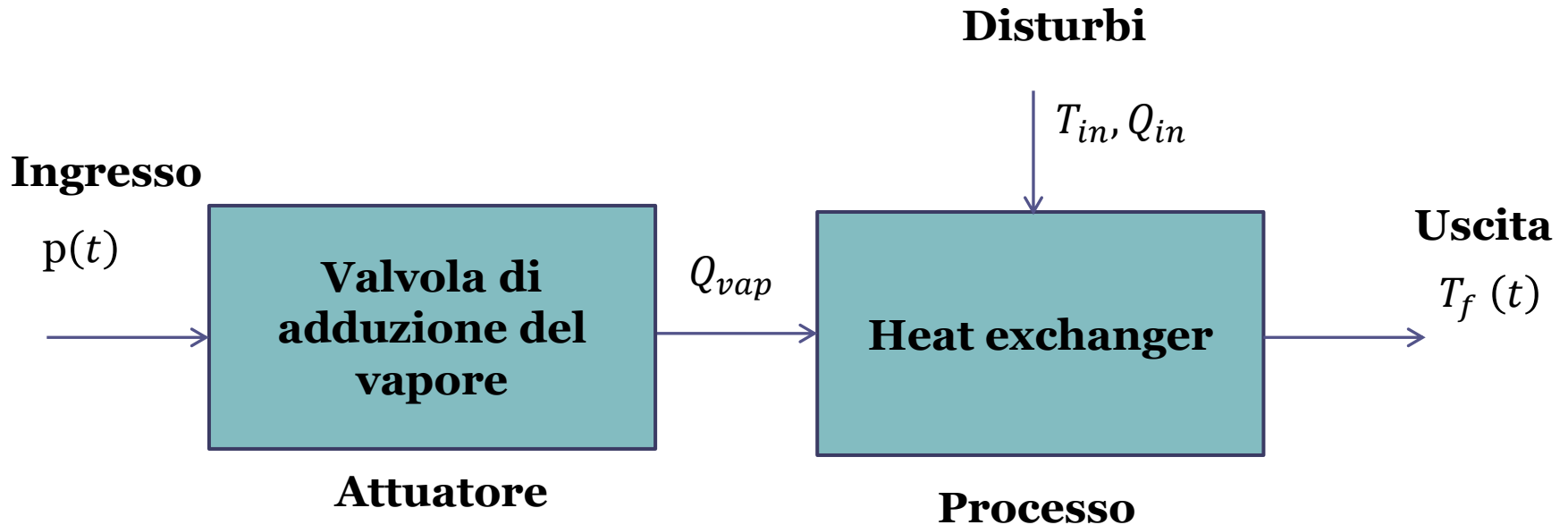
E' un processo la cui dinamica predominante è costituita da fenomeni di scambio termico fra il liquido contenuto nel serbatoio ed il vapore ad alta temperatura.

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

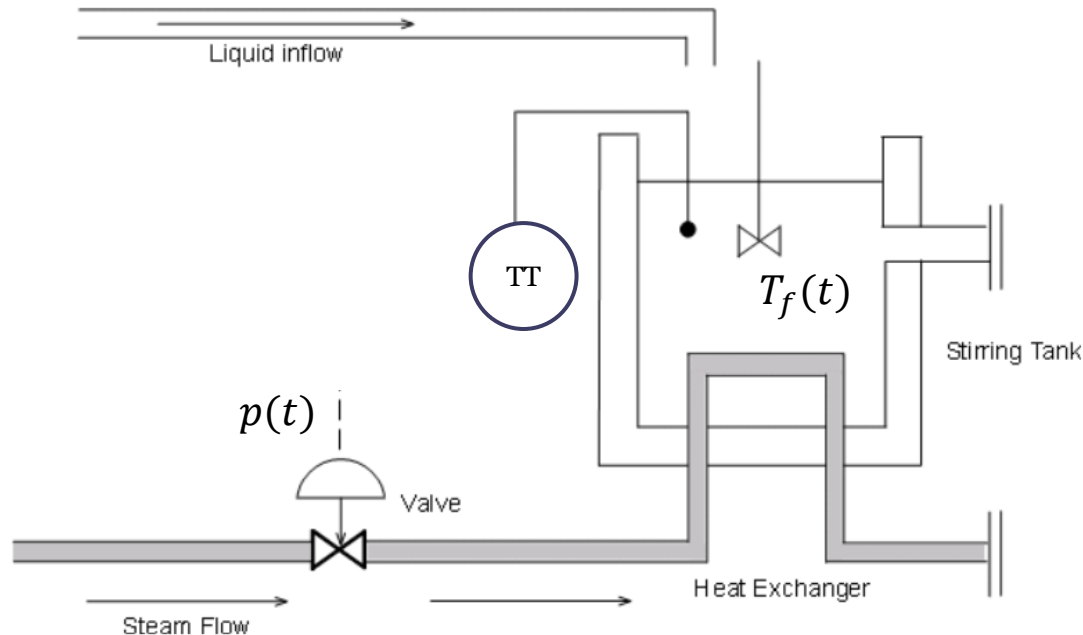




Una rappresentazione più articolata, che distingue il processo vero e proprio dal blocco attuatore, potrebbe essere la seguente

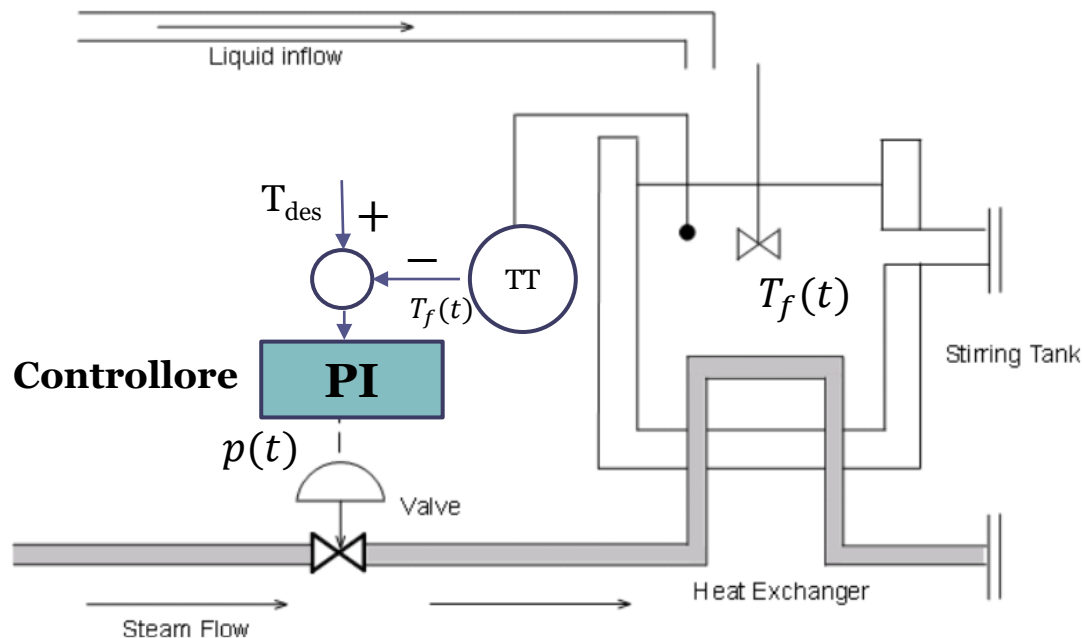


**Come lo controlliamo ?**



Se la portata e la temperatura del fluido in ingresso si mantengono costanti, si può individuare un valore costante per l'apertura percentuale della valvola che fa sì che la temperatura dell'acqua in uscita coincida con il valore desiderato.

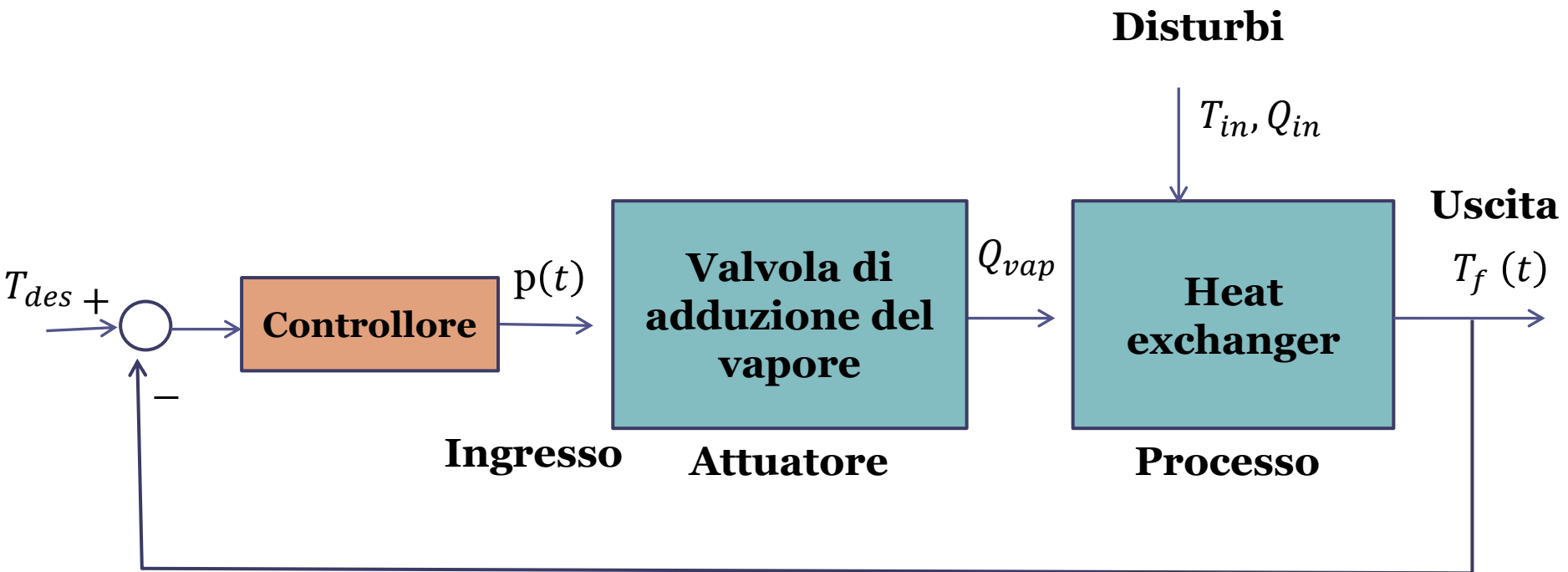
Tale modo di procedere però da un lato richiederebbe la riconfigurazione del controllo in corrispondenza di variazioni nelle caratteristiche del fluido in ingresso, dall'altro risentirebbe di alterazioni nelle proprietà fisiche dello scambiatore (ad es., per invecchiamento delle tubazioni e delle coibentazioni).



Risulta pertanto 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.

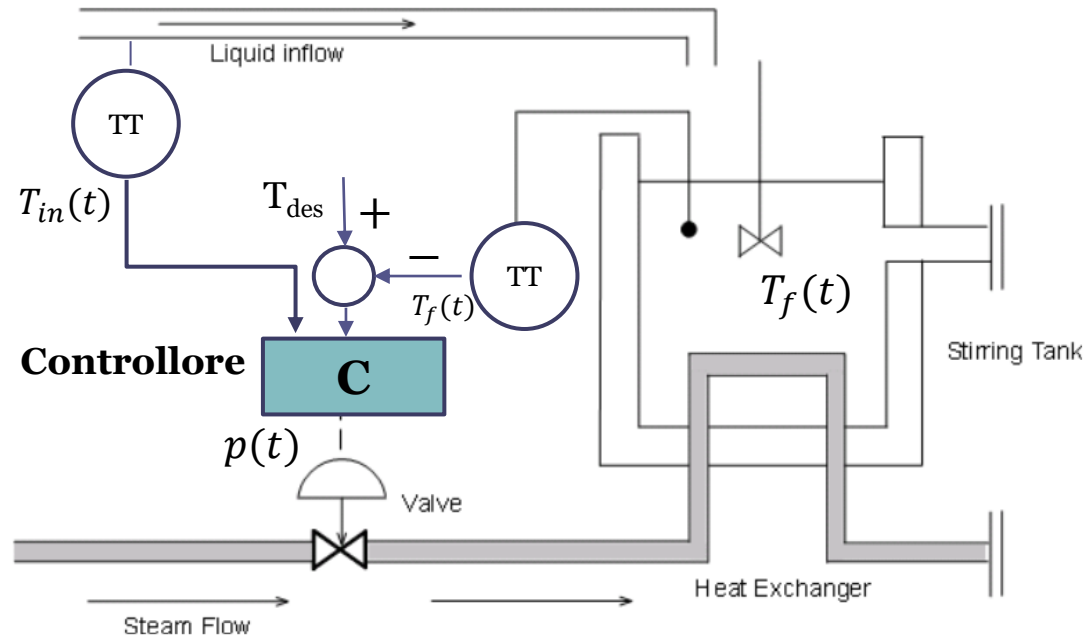
Nella pratica industriale sono molto utilizzate, per varie ragioni, servovalvole ad attuazione pneumatica. In tale caso è necessario interporre fra il controllore (che fornisce un segnale elettrico in uscita) e la servovalvola un opportuno dispositivo di interfaccia (ad es. un convertitore corrente/pressione).

In termini di **schema a blocchi**



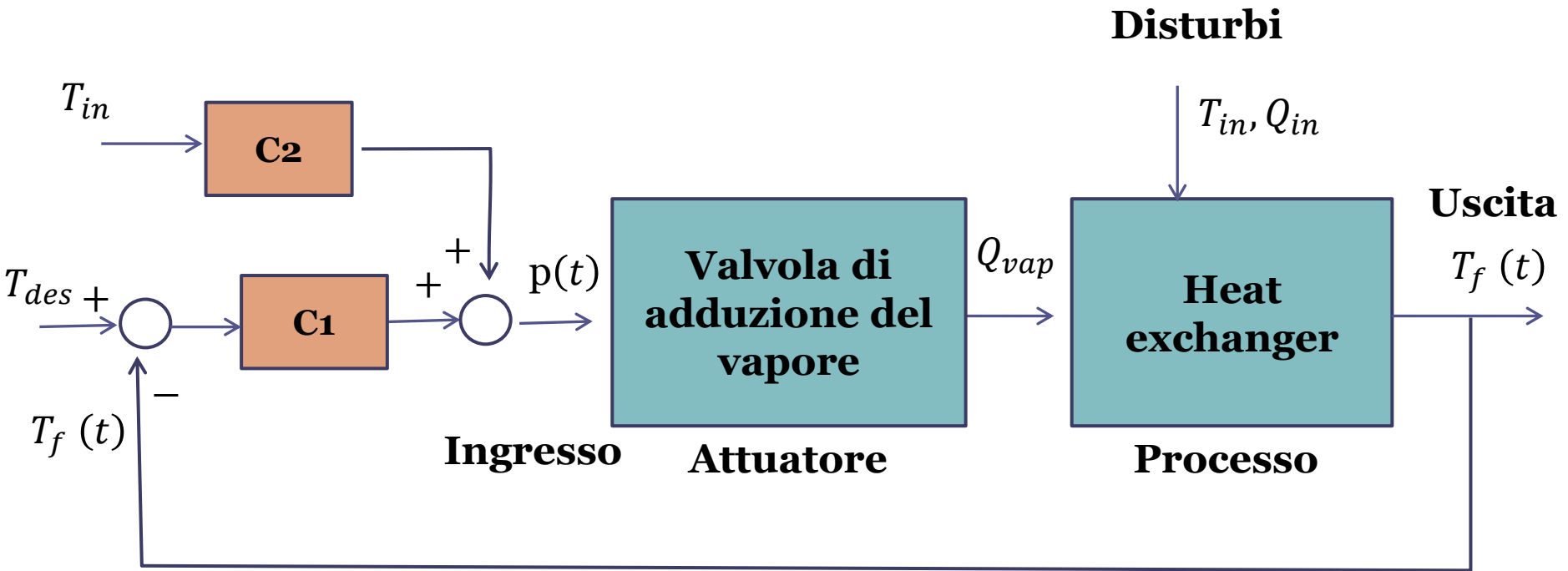
Questa è la notazione che impiegheremo nel corso, e dobbiamo imparare a pensare ai sistemi di controllo in tali termini. Ciò ci metterà a disposizione dei potenti strumenti di analisi, anche di architetture complesse, e di sintesi.

## Controllo con compensazione del disturbo

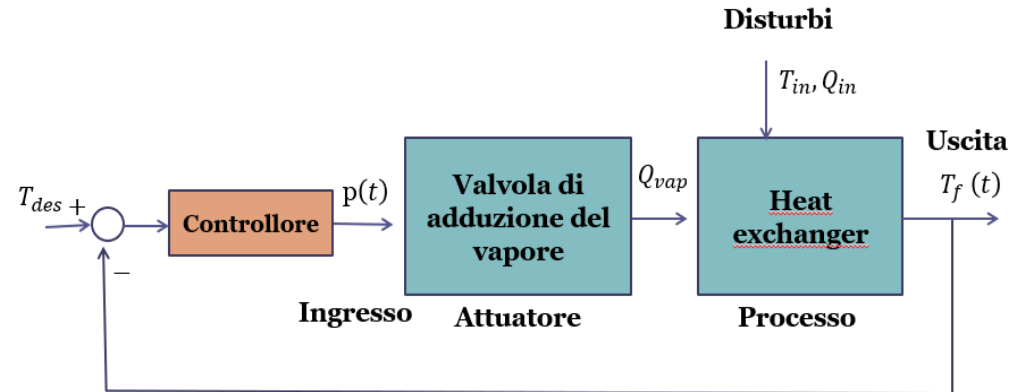


Se è possibile misurare la temperatura e/o la portata del fluido in ingresso (se è cioè possibile misurare il segnale disturbante) può essere realizzata una regolazione più sofisticata in cui il controllore ha accesso anche a tale misura e può «anticipare» opportune misure correttive. Vedremo più avanti 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**



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.