

# Controlli automatici

## Introduzione al corso

**Ing. 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 di controllo automatico** ed in particolare di quelli in **retroazione**

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

 [Filtra risultati](#)

## Controlli Automatici - informazioni generali e avvisi

Controlli Automatici - informazioni generali e avvisi

Data: [01 ottobre 2020](#)

## Controlli Automatici - slides lezione

Controlli Automatici - slides lezione

Data: [01 ottobre 2020](#)

testo in introduzione

## Matlab-Simulink per l'Ingegneria

Matlab-Simulink per l'Ingegneria. Informazioni generali avvisi e materiale didattico

Data: [01 ottobre 2020](#)

 [Curriculum](#)

 [Insegnamenti](#)

 [Materiale didattico](#)

 [Tesi](#)

 [Ricerca](#)

 [Avvisi](#)

 [Agenda](#)

Nelle pagine «Controlli Automatici» sarà pubblicato tutto il materiale didattico e gli avvisi.

**Old page:**

**<http://people.unica.it/alessandropisano/controlli-automatici-2/>**

**Slides proiettate a lezione:**

Introduzione al Corso

Funzioni di trasferimento, schemi a blocchi e sistemi elementari

Tabella trasformate di Laplace

Luogo delle radici

Comportamento a regime

Criteri di Bode e Nyquist

Regolatori PID – Files Simulink

Controllo Feedforward – Files Simulink

**Dispense**

Comportamento a regime

Sistemi con ritardo

**Materiale esercitazioni**

Esercitazione 1 – Files Esercitazione 1

Esercitazione 2 Soluzione Es 2

Esercitazione 3

Esercitazione 4 – sistemi con ritardo Slides Files Simulink

Esercitazione 5 Sistemi di controllo in cascata Slides Files Simulink

**Preparazione alla prova intermedia**

Prova intermedia 2016

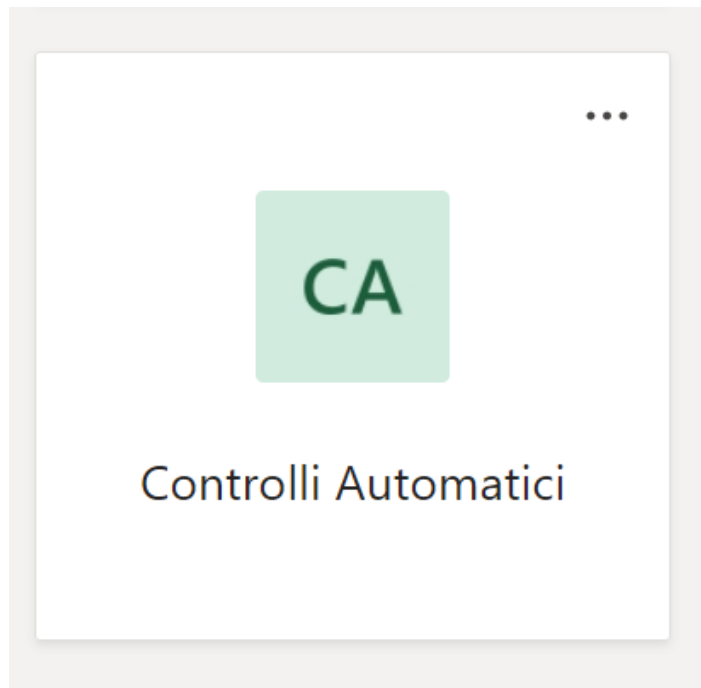
Esercizi di preparazione alla prova intermedia

**Preparazione alla prova finale**

Prova finale 2014 – Soluzioni Es. 1 e 3

## Team Microsoft «Controlli Automatici»

<https://teams.microsoft.com/l/team/19%3a3fa7c5b0b0c0491cb5391d14a50de5c9%40thread.tacv2/conversations?groupId=34264a57-f9ec-4331-8133-5c235c8b0817&tenantId=6bfa74cc-fe34-4d57-97d3-97fd6e0edee1>



Vi invito a iscrivermi a questo Team, che utilizzeremo per **tutoraggio e ricevimento studenti**, oltre che per fare lezione a fronte di malfunzionamenti della piattaforma Abode Connect.

**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



Solamente se sarà possibile  
fare gli scritti in presenza  
senza troppi problemi  
(improbabile)

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

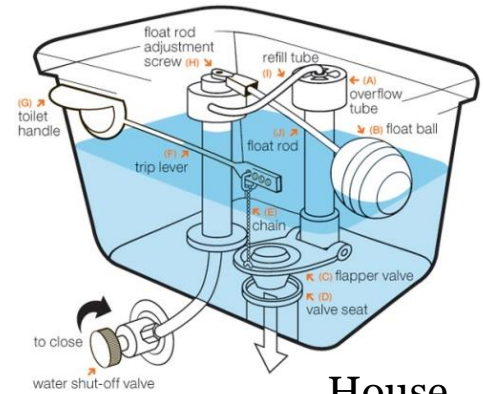


Noise canceling headphones

HDD



Aerospace



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) ?

-  [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](#)



# Challenges

FOR CONTROL RESEARCH

## Stair-Climbing Assistive Robots

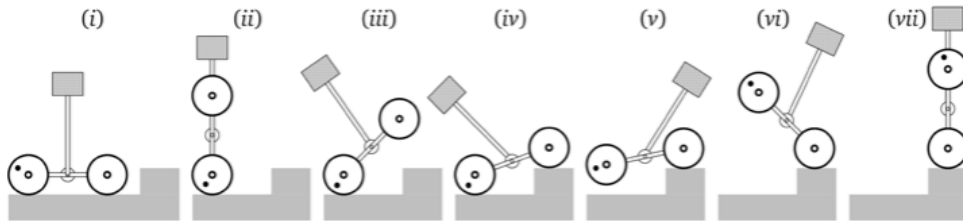
A major drawback of assistive robotic devices for the mobility-impaired, such as wheelchairs or the Segway, is their inability to negotiate stairs and steps. Wheel-based systems are advantageous compared to other motion mechanisms because of their energy efficiency, relatively high velocity, and simple design, but enabling them to climb or descend stairs without manual support is an outstanding challenge for control engineers.



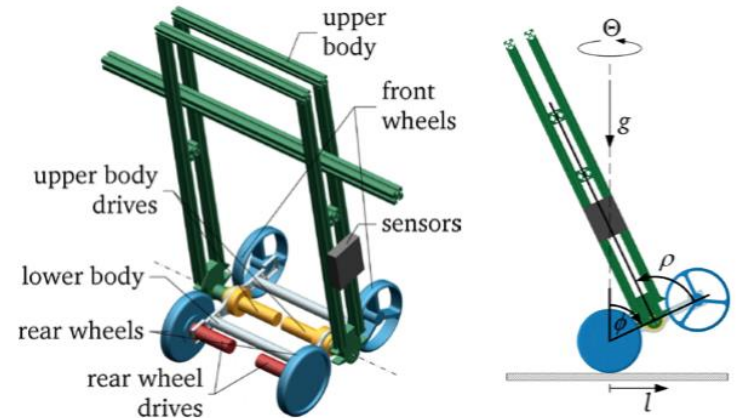
A single step as an obstacle for the wheelchair driver (Source: www.bsk-ev.org)



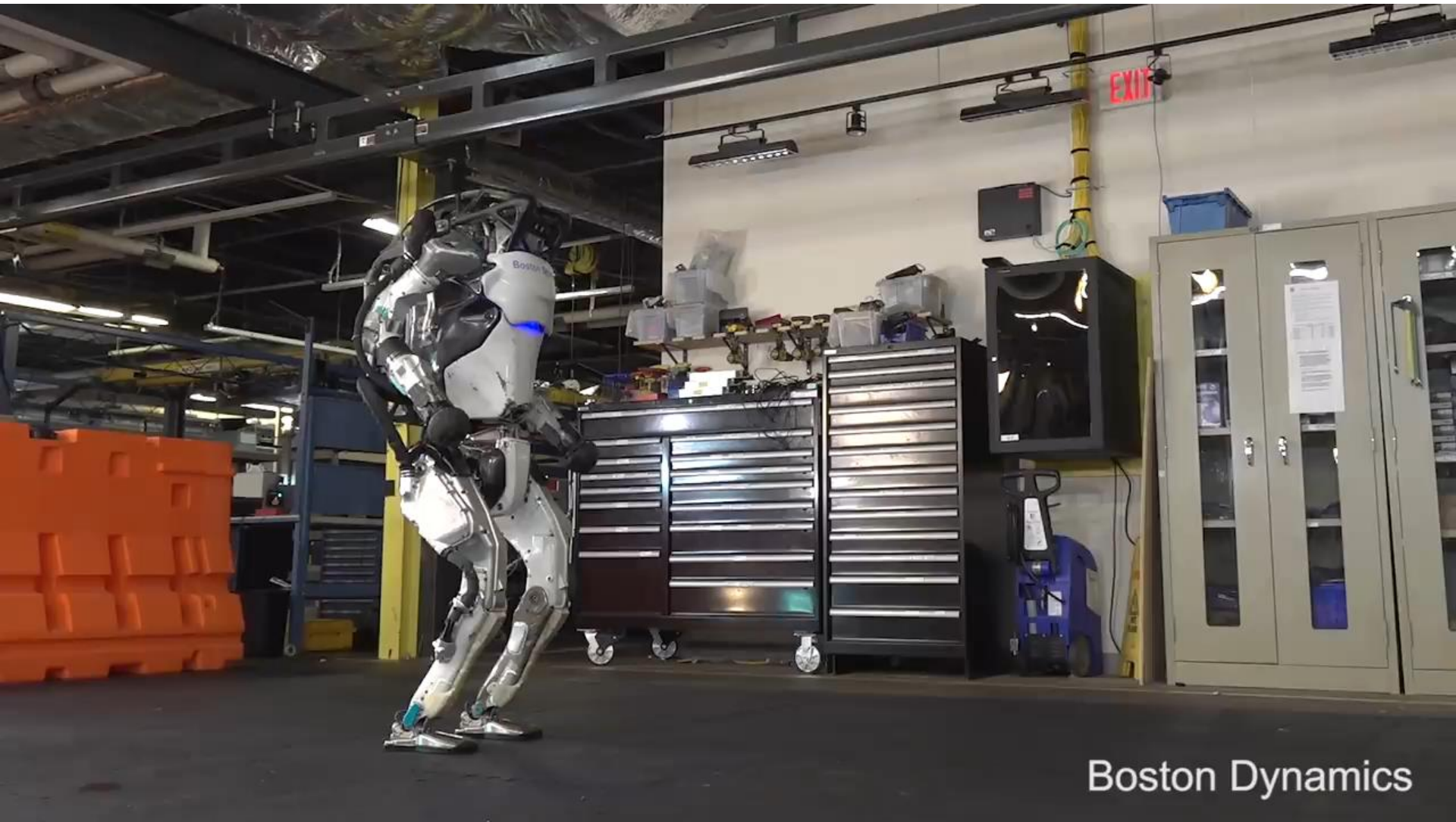
Manually overcoming stairs (Source: M.J. Lawn, Study of stair-climbing assistive mechanisms f thesis, Nag



A sequence of SCD configurations for stair climbing

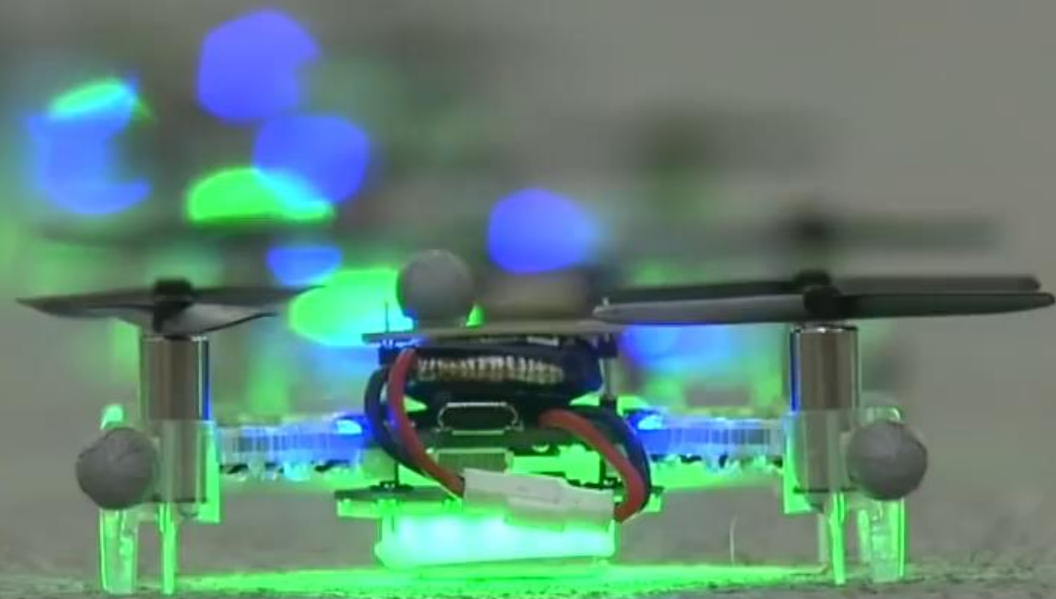


CAD model of the SCD (above left) with main degrees of freedom (above right): position  $l$ , lower body angle  $(\theta)$ , upper-lower body angle  $(\rho)$ , yaw angle  $(\Theta)$ , and gravitational acceleration  $g$



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)

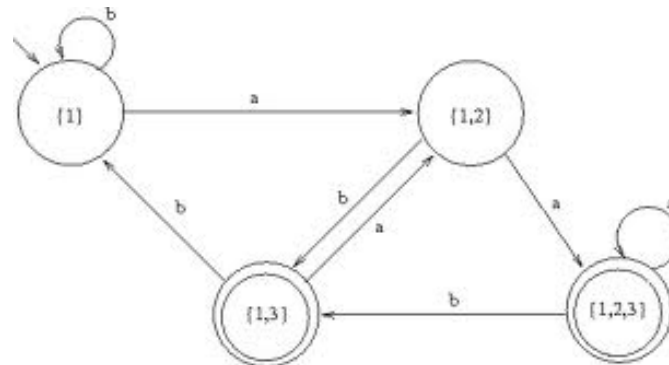
$$M\ddot{x} + B\dot{x} + kx = F(t)$$

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

**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”



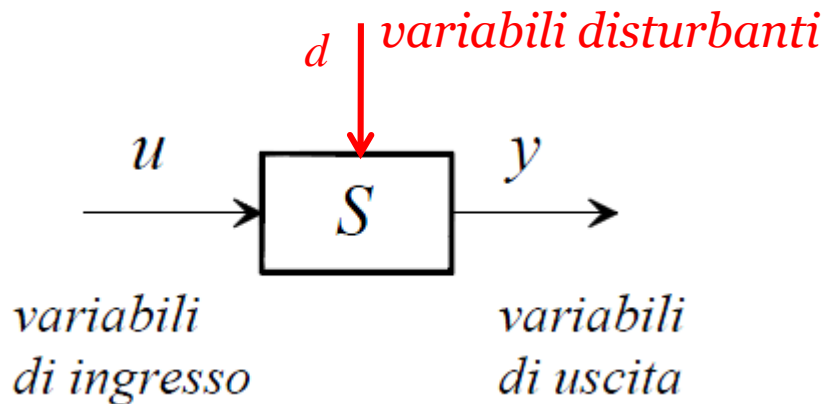
Ingressi

“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.

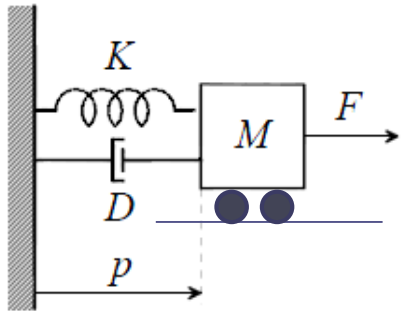
La relazione che sussiste tra variabili di ingresso e di uscita è di **causa-effetto**.

Possono intervenire ingressi non controllabili (**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 il comportamento del processo vengono dette “**variabili di stato**”

## Sistemi dinamici: esempi

Oscillatore meccanico:  $F(t) = M\dot{v}(t) + Dv(t) + Kp(t)$



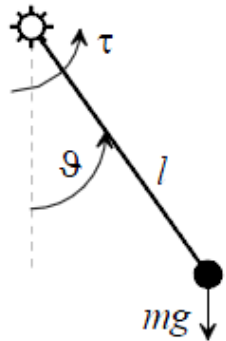
ingresso:  $u = F$

uscita:  $y = p$

var. di stato:  $x_1 = p, x_2 = v$

Pendolo:

$$\tau(t) = ml^2\dot{\omega}(t) + mgl \sin(\vartheta(t))$$



ingresso:  $u = \tau$

uscita:  $y = \vartheta$

var. di stato:  $x_1 = \vartheta, x_2 = \omega$

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.

**Oscillatore meccanico:** SISO, LTI

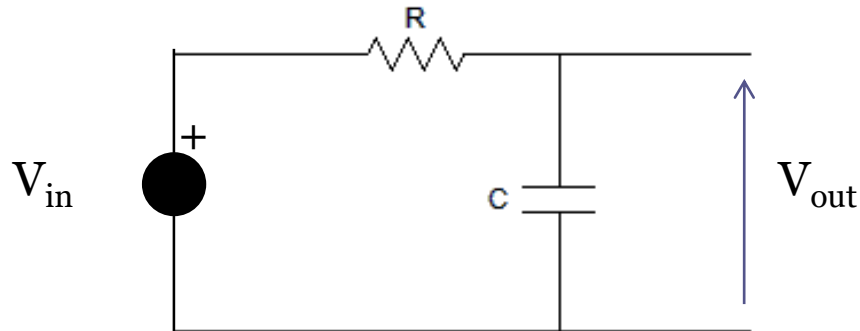
$$F(t) = M\dot{v}(t) + Dv(t) + Kp(t)$$

**Pendolo:** SISO, non lineare

$$\tau(t) = ml^2\dot{\omega}(t) + mgl \sin(\vartheta(t))$$

## Modellistica di un circuito elettrico

Consideriamo un filtro RC



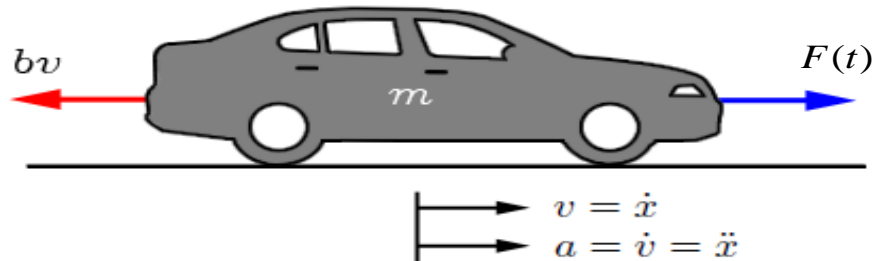
**Ipotesi di lavoro**

Comportamento lineare della resistenza e del condensatore

**Equazione differenziale**

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

## Modellistica 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**

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

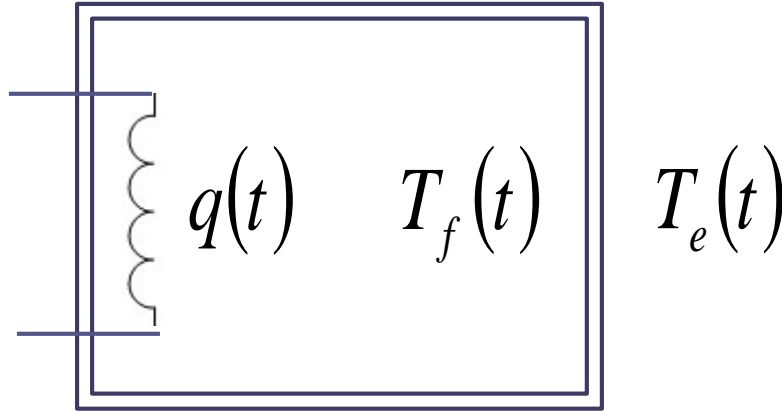
$$m\dot{v}(t) + bv(t) = F(t)$$

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

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

## Modellistica di un processo termico

Consideriamo un **sistema termico** rappresentato da un volume  $V$  circondato da una parete e contenente un **fluido**



### Ipotesi di lavoro

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

Sia  $T_e(t)$  [K] la temperatura esterna alla parete,  $T_f(t)$  [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/K s) 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 dello sistema termico ?

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

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



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

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

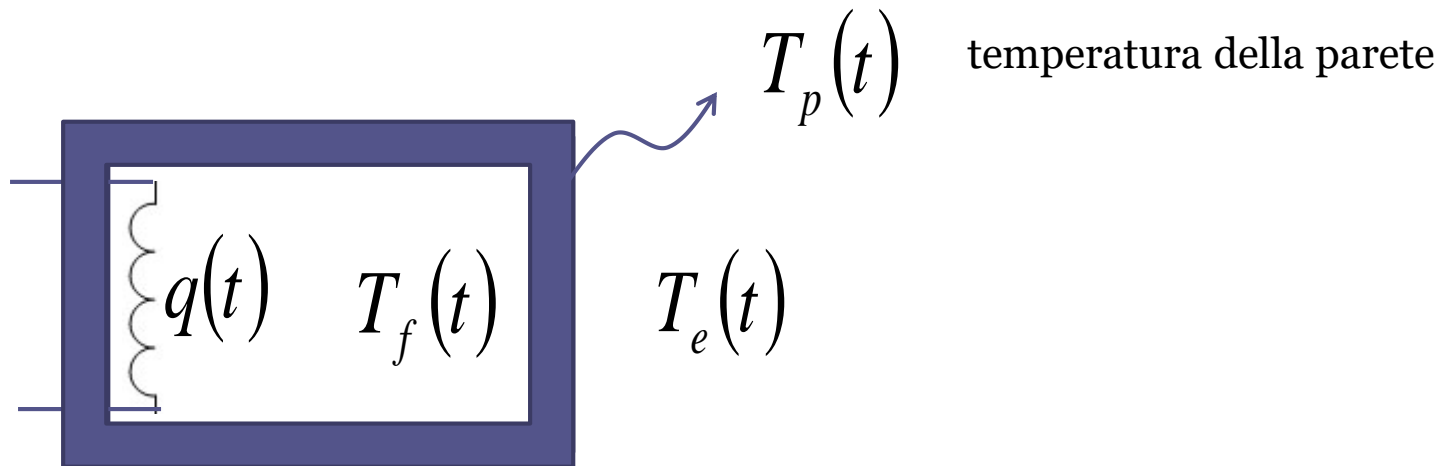
Per comprenderlo, classifichiamo i segnali che intervengono nelle due equazioni differenziali.

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 parte 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.

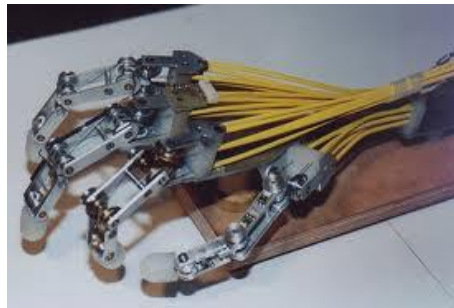
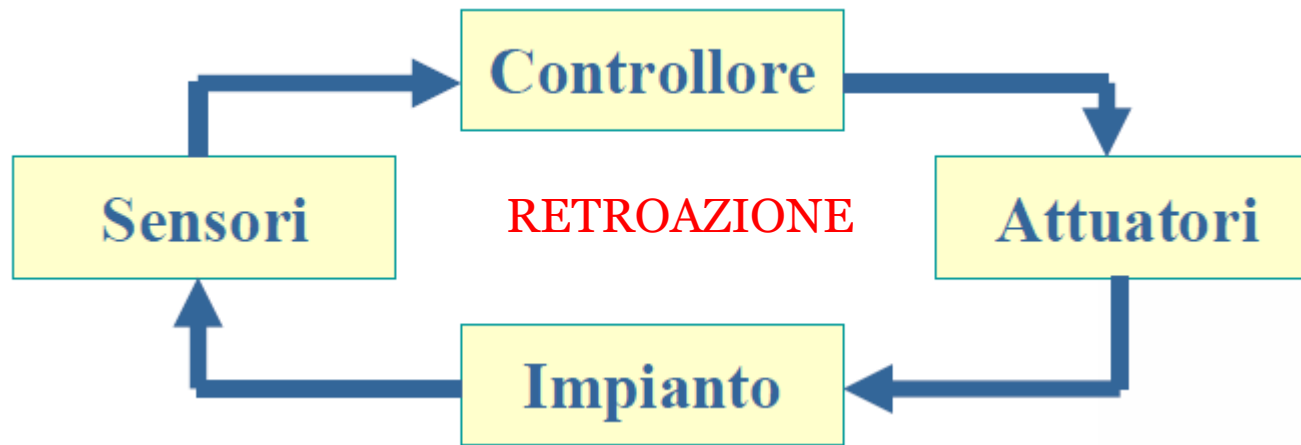
Legame I/O

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

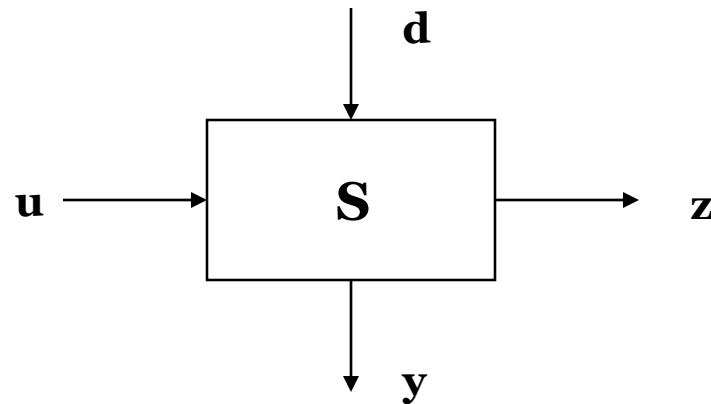
$$C_p \dot{T}_p(t) = K_{pe} (T_e(t) - T_p(t)) - K_{ip} (T_p(t) - T_f(t))$$

## 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



## ELEMENTI COSTITUTIVI DI UN PROBLEMA DI CONTROLLO



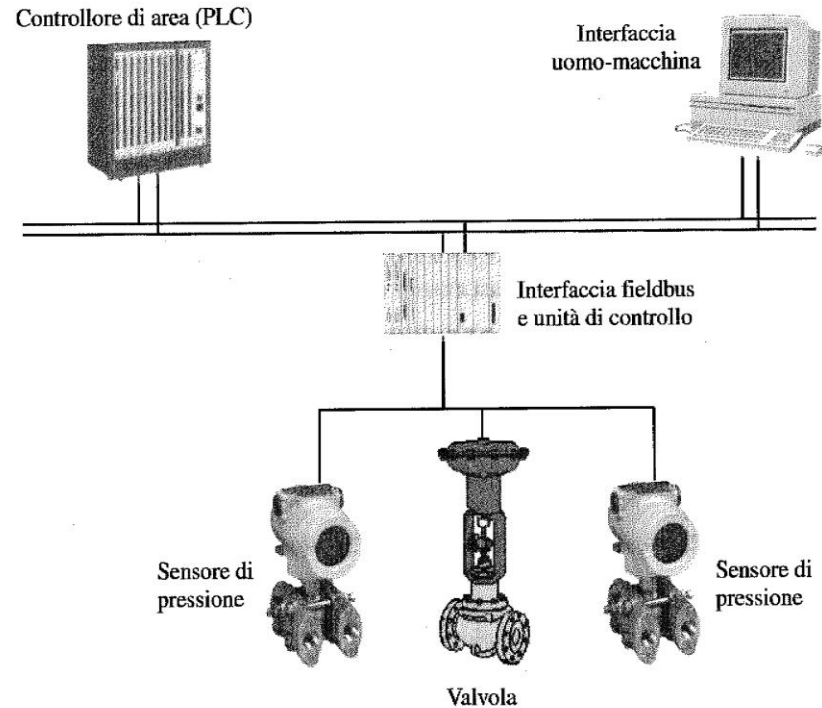
- **SISTEMA DA CONTROLLARE**, **S** (modello)

- variabili di ingresso:
  - $\mathbf{u}$  = **variabili di controllo** (manipolabili)
  - $\mathbf{d}$  = **disturbi** (non manipolabili, talvolta misurabili)
- variabili di uscita:
  - $\mathbf{z}$  = **variabili controllate**
  - $\mathbf{y}$  = **variabili misurate**

- **COMPORAMENTO DESIDERATO**

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

# COMPONENTI DEI SISTEMI DI CONTROLLO “MODERNI”



## • Componenti base

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

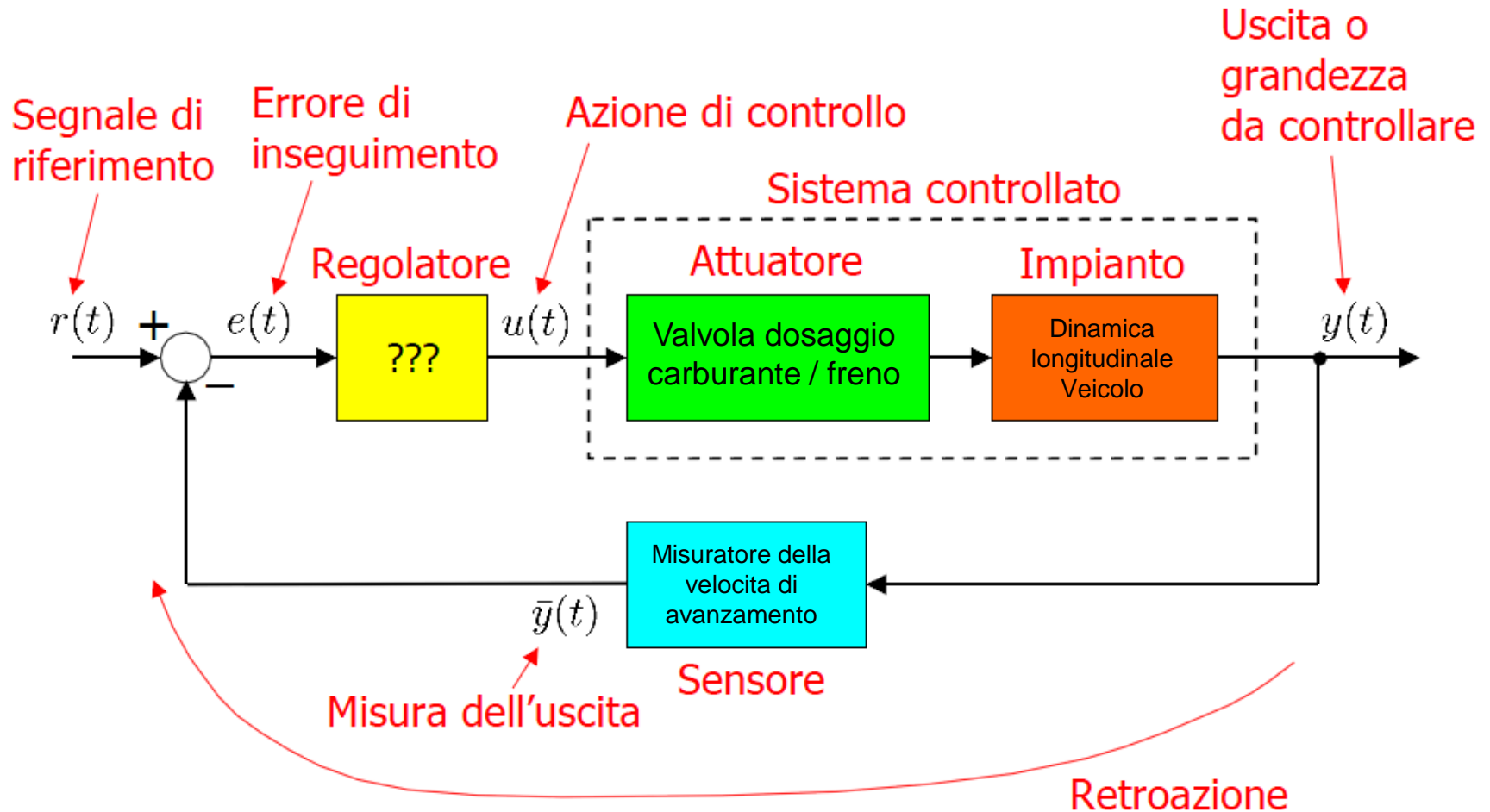
## • Altri componenti

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

## Struttura tipica di un sistema di controllo

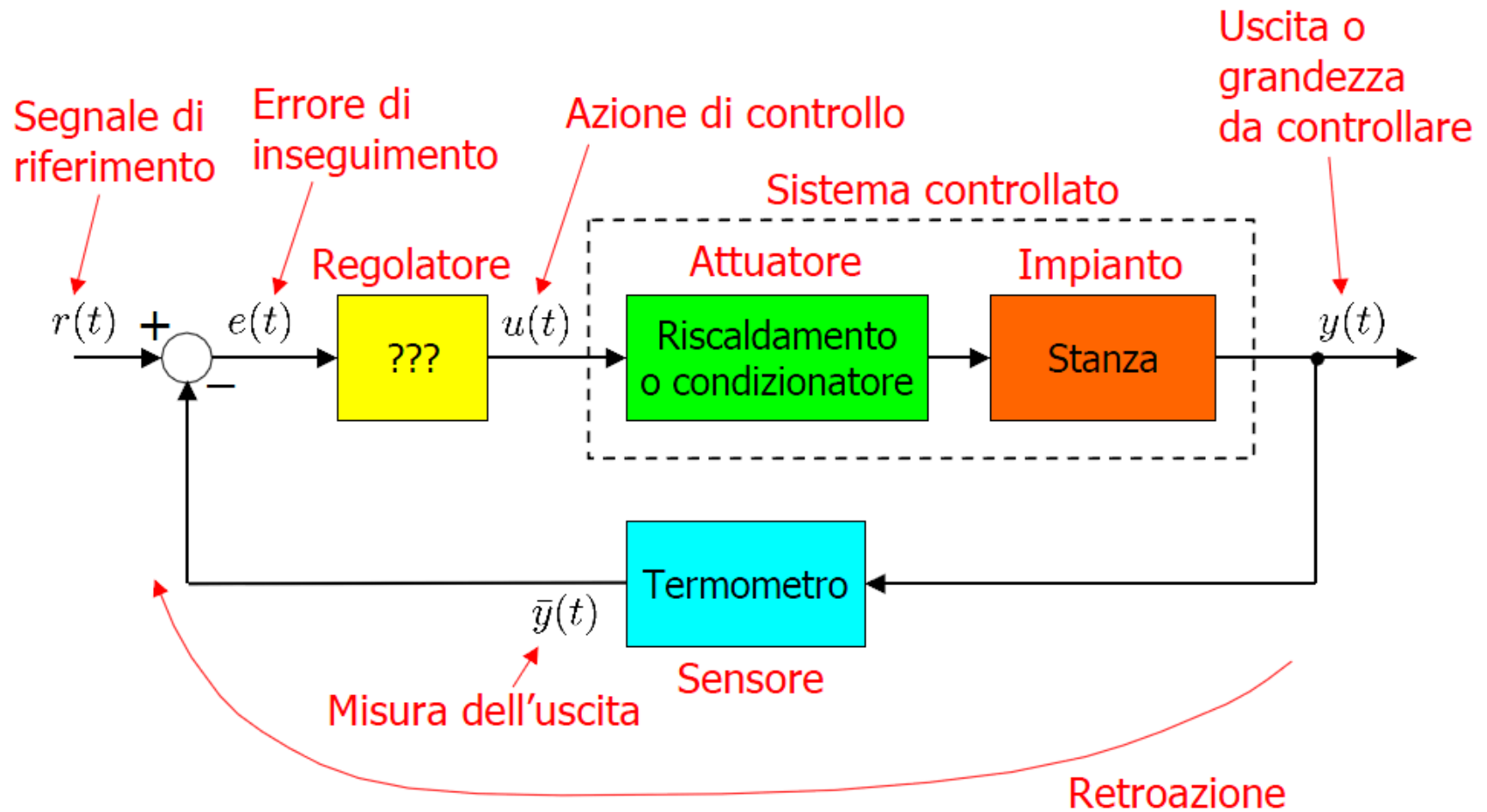
Sistema di Controllo in **Retroazione**

Regolazione della velocità longitudinale di un veicolo (cruise control)

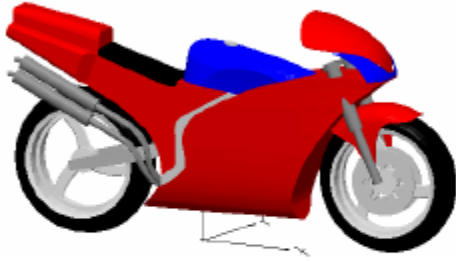


## Struttura tipica di un sistema di controllo

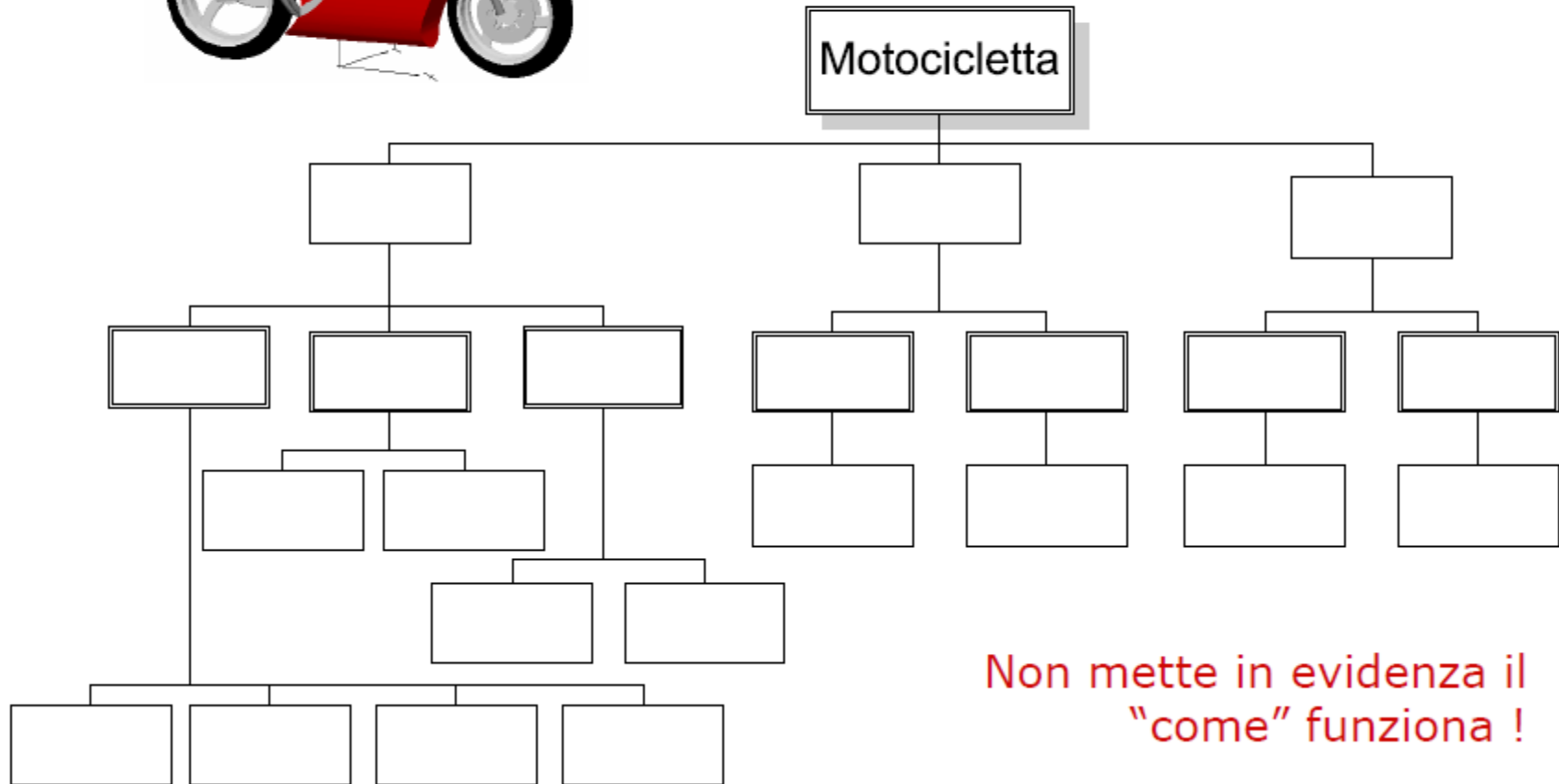
Sistema di Controllo in **Retroazione**      Regolazione della temperatura in un ambiente



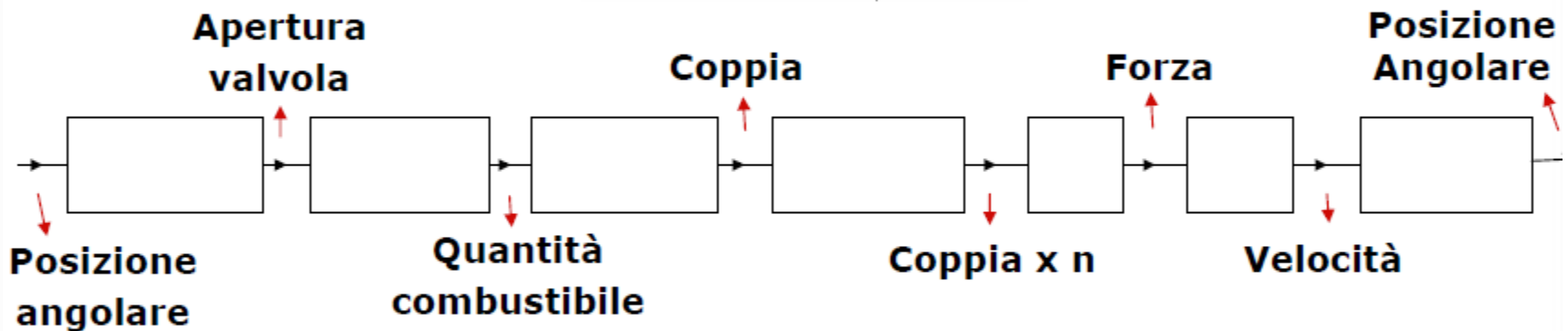
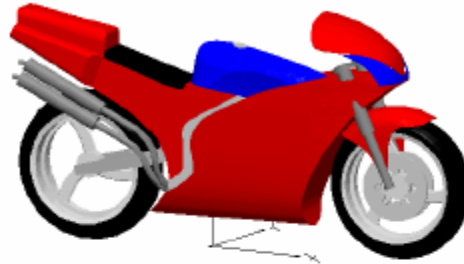
## Decomposizione Gerarchica di un Sistema



Utile per un autoricambi  
Simile al modello di esplorazione del Web

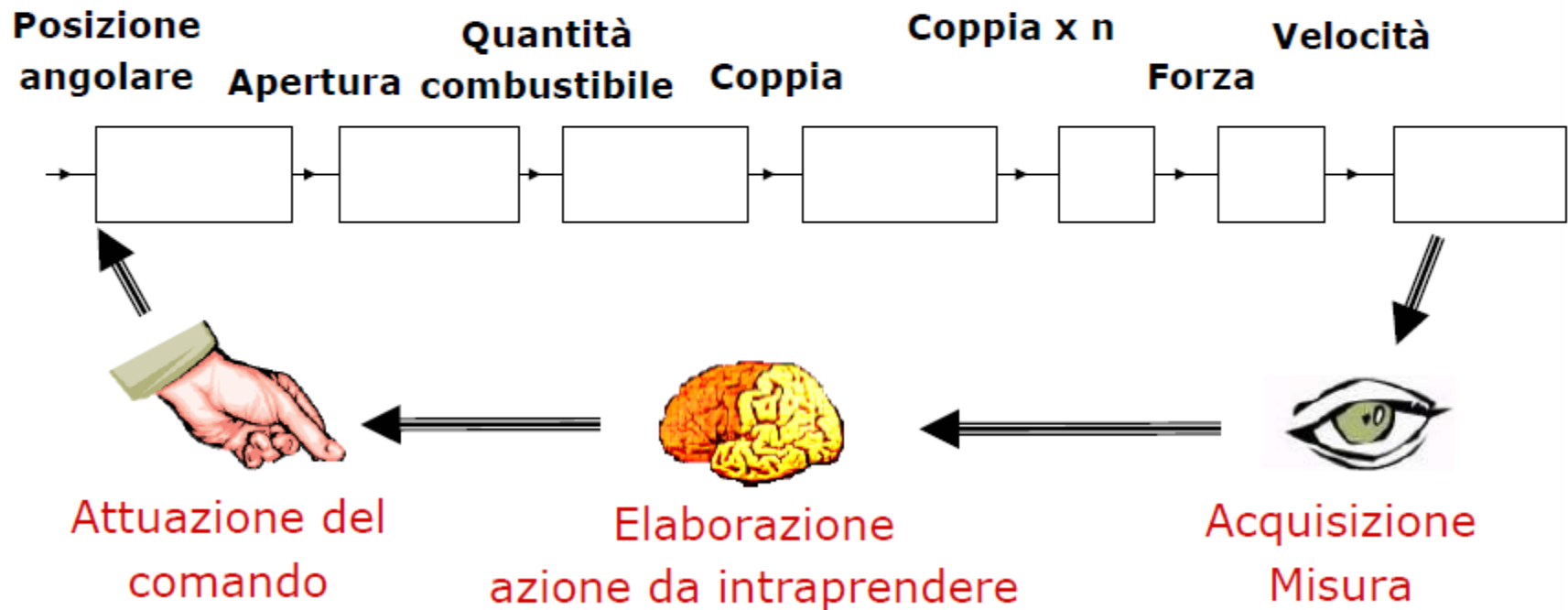
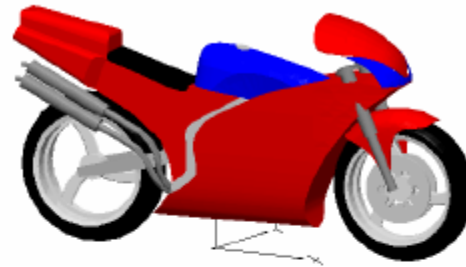


## Decomposizione Funzionale di un Sistema

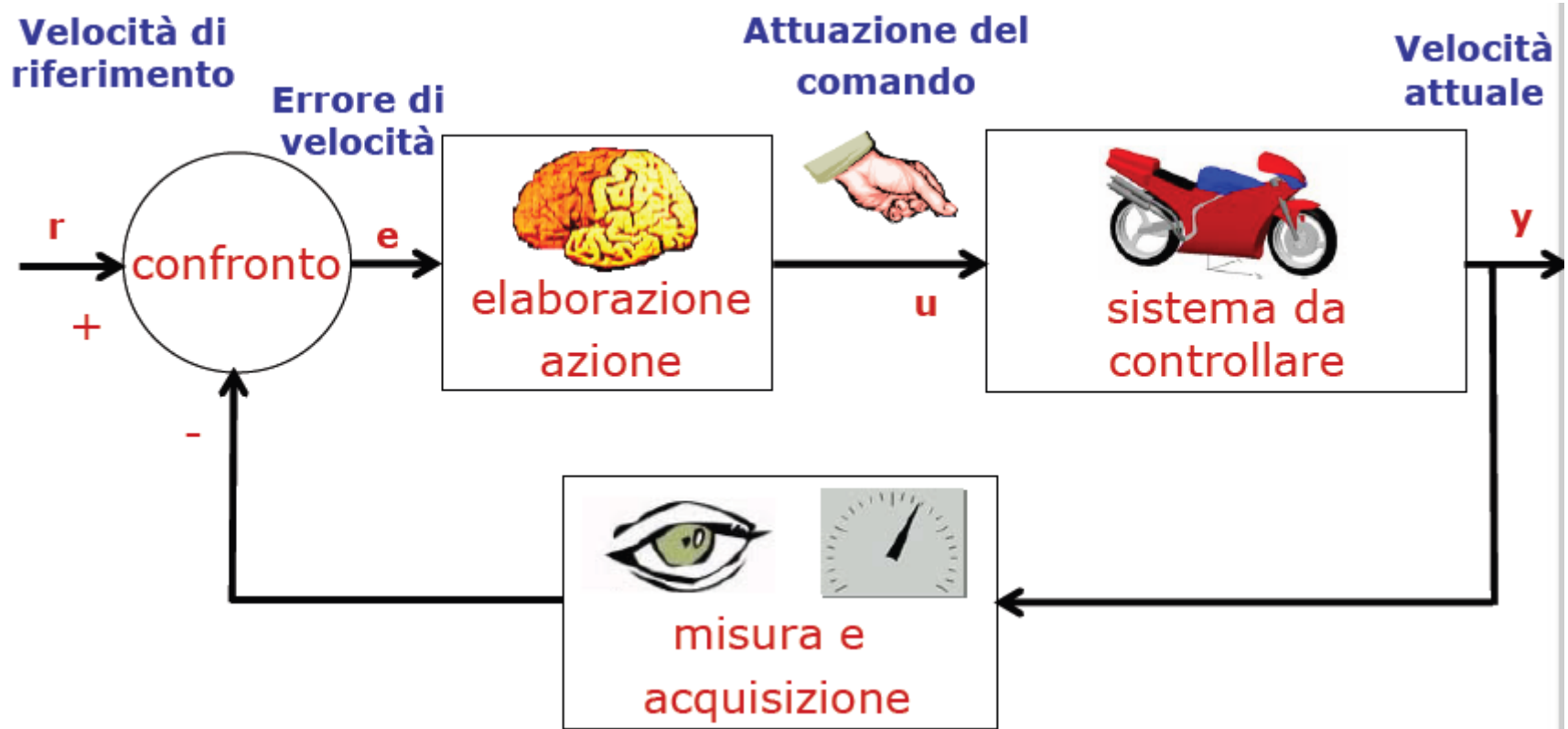


Esprime quelle relazioni di **causa-effetto** a noi necessarie per capire il funzionamento del sistema e per poter intervenire su di esso !

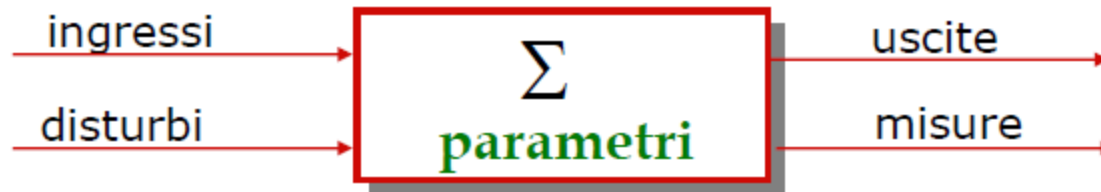
# Controllo manuale della guida



## Schema standard in retroazione



## Blocchi strutturali: relazioni di causa - effetto



- 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)
- 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)

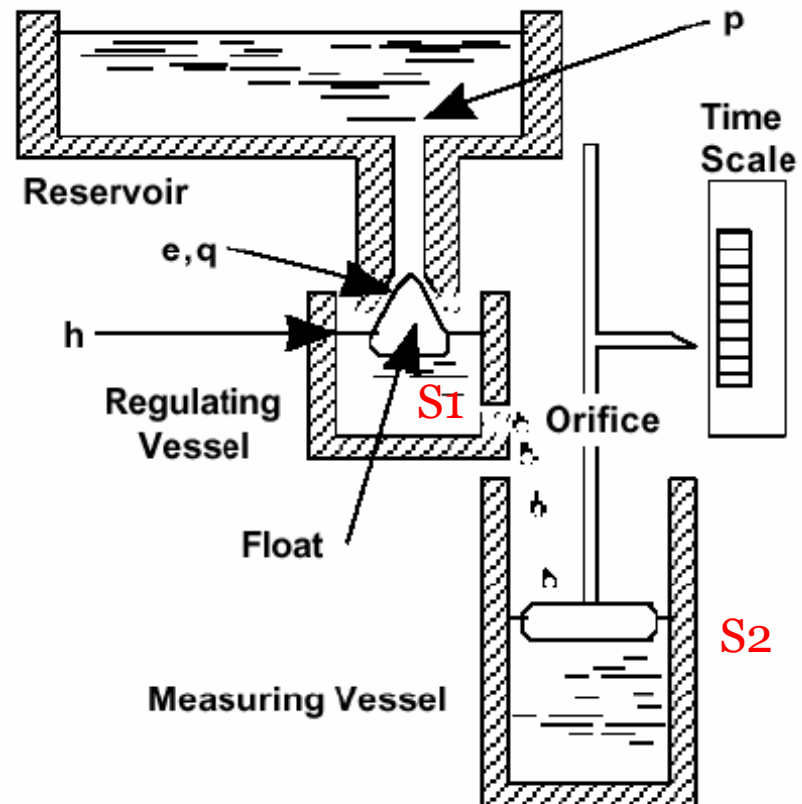
## La genesi del feedback

### Orologio ad Acqua di Ktesibios (270 AC)

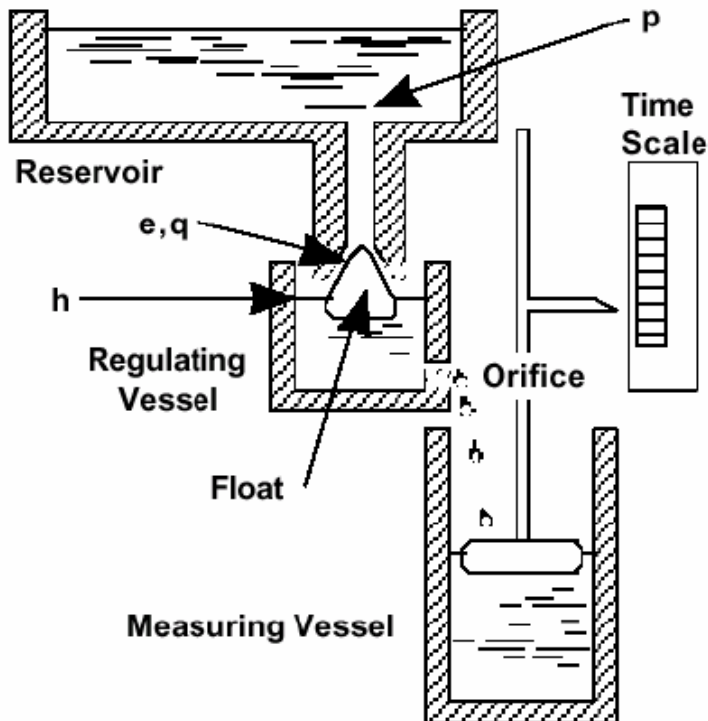
La controreazione è usata per mantenere costante il livello  $h$  dell'acqua nel serbatoio centrale  $S_1$

$h$  = actual level  
 $e$  = valve opening  
 $p$  = water supply pressure  
 $q$  = flow rate of water entering regulating vessel

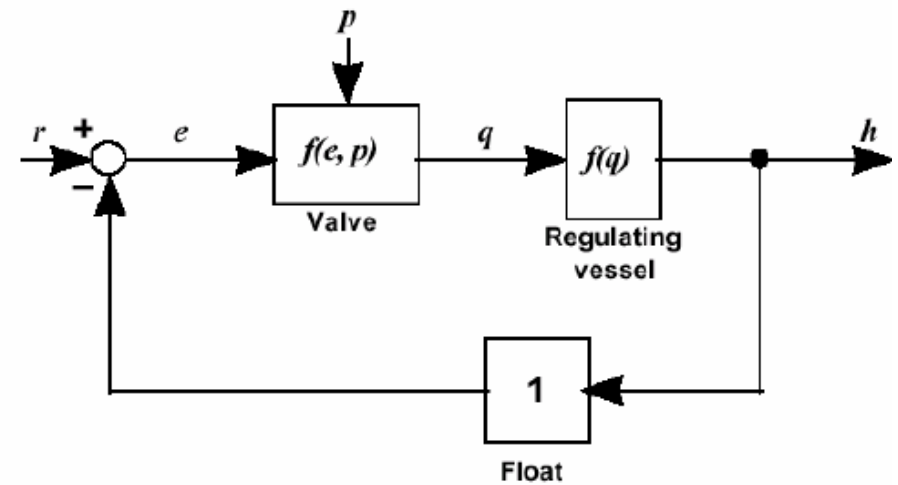
Klepsydra (ladra d'acqua)



## Orologio ad Acqua di Ktesibios (270 AC)

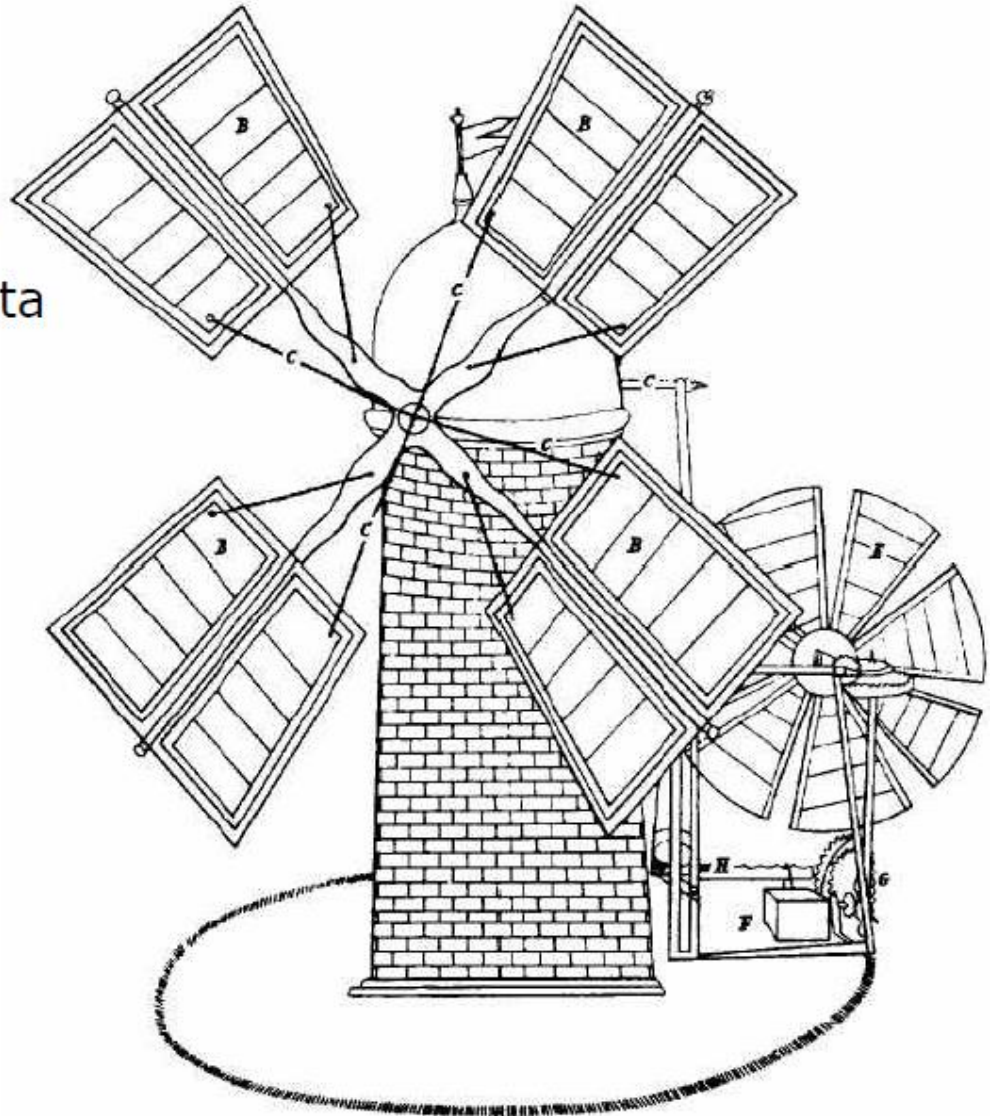
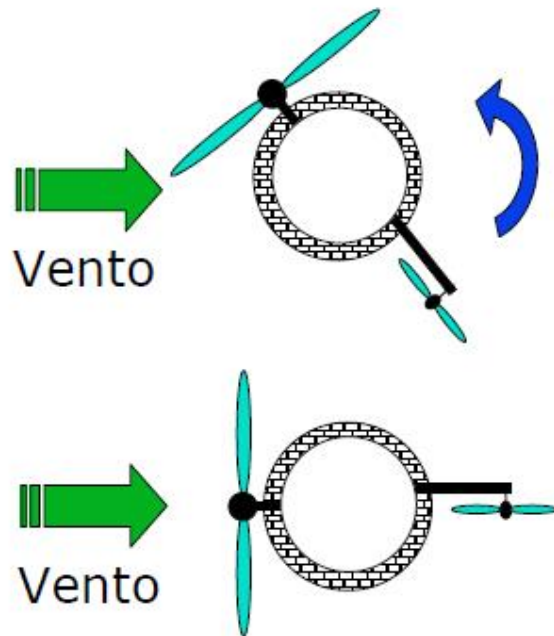


$r$  = desired level (position of float when valve is closed)  
 $h$  = actual level  
 $e$  = valve opening  
 $p$  = water supply pressure  
 $q$  = flow rate of water entering regulating vessel



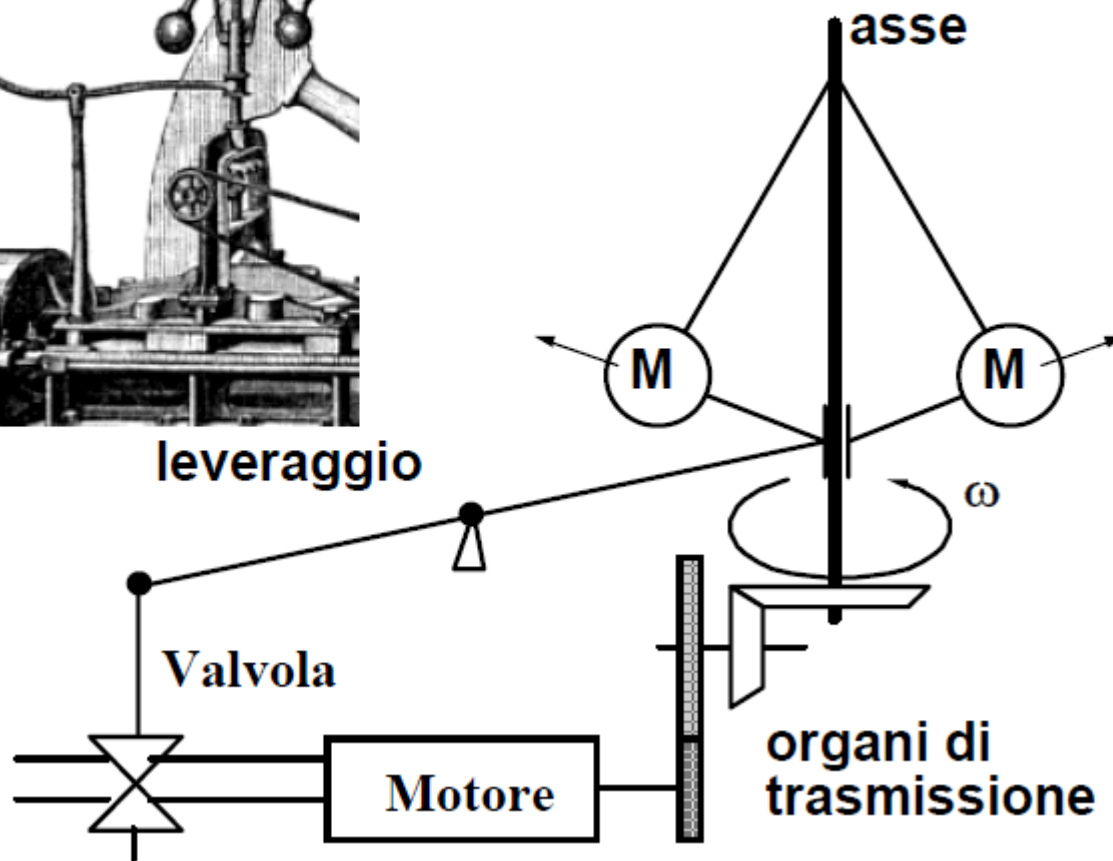
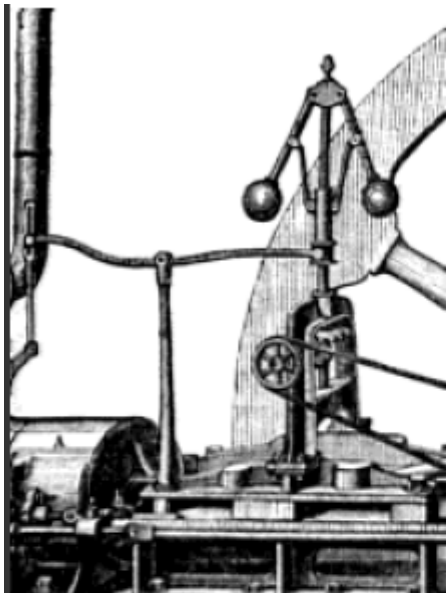
## Sistema automatico di puntamento

- 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



più veloce gira l'asse,

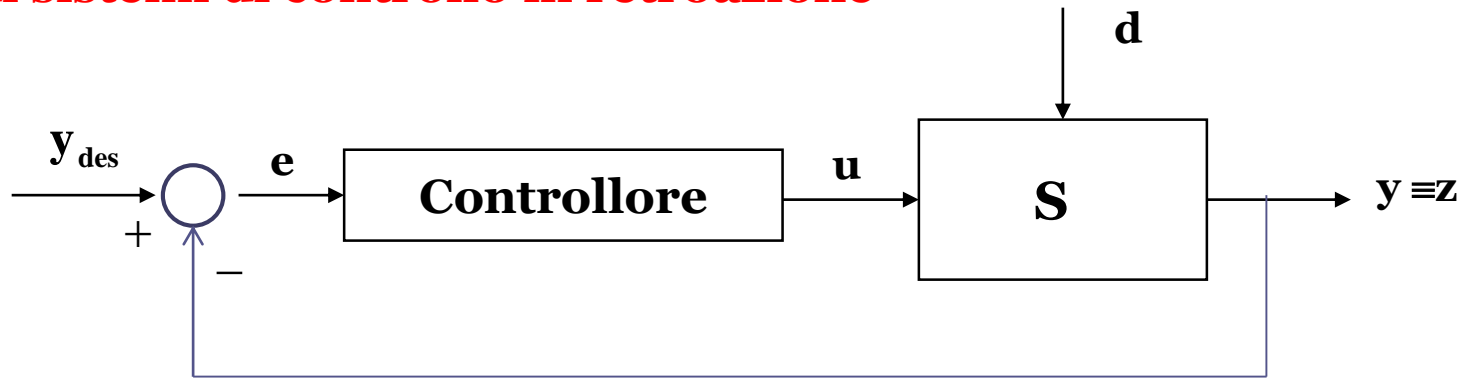
più le masse sono spinte dalla forza centrifuga,

più la valvola si chiuderà,

meno vapore alimenterà il motore,

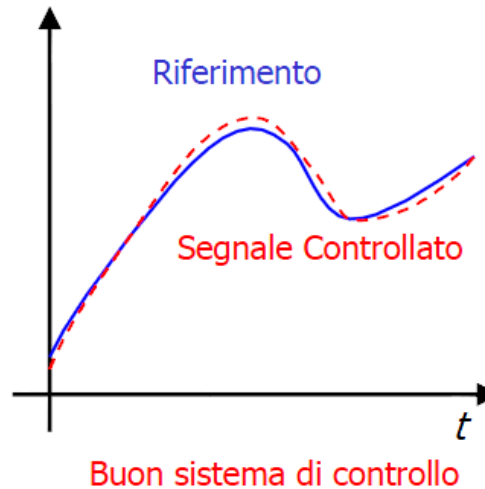
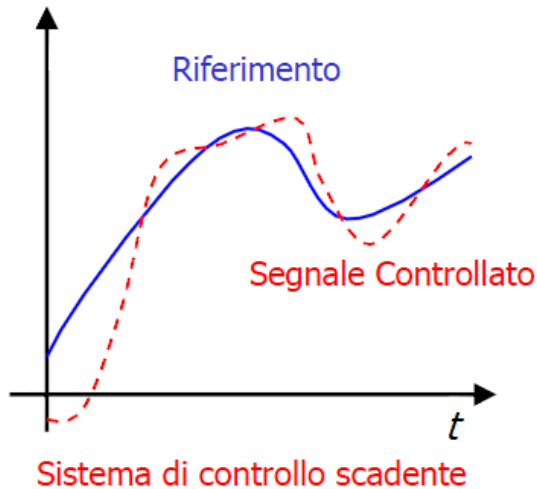
meno velocemente girerà l'asse!

## 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



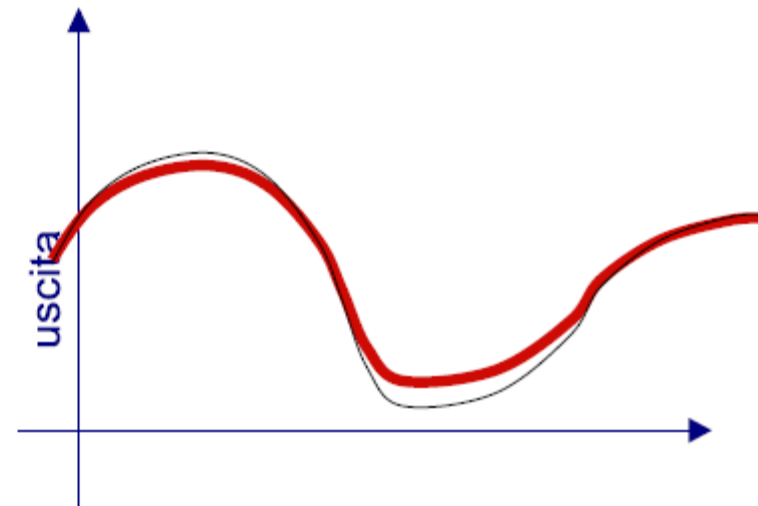
sistemi di **regolazione** vs.  
sistemi di **asservimento**.

## 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)

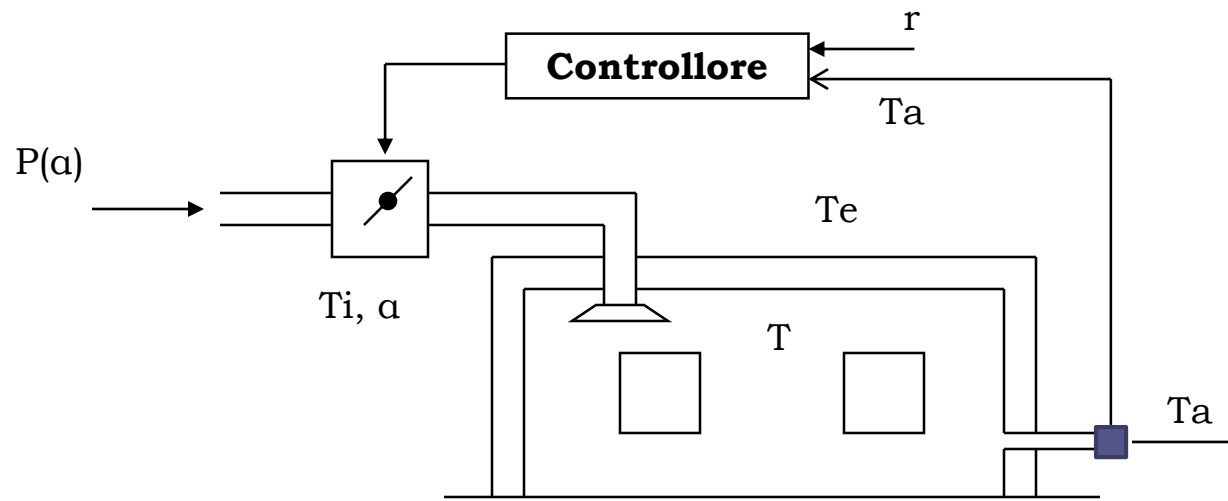


- Controllo del Moto (Servomeccanismi)
- La grandezza controllata è una variabile di tipo meccanico (**posizione, velocità**)
- Controllo di Processo
- La variabile di uscita controllata non è di tipo meccanico ma rappresenta comunque una grandezza fisica (**temperatura, pressione, tensione, corrente,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



## ESEMPIO

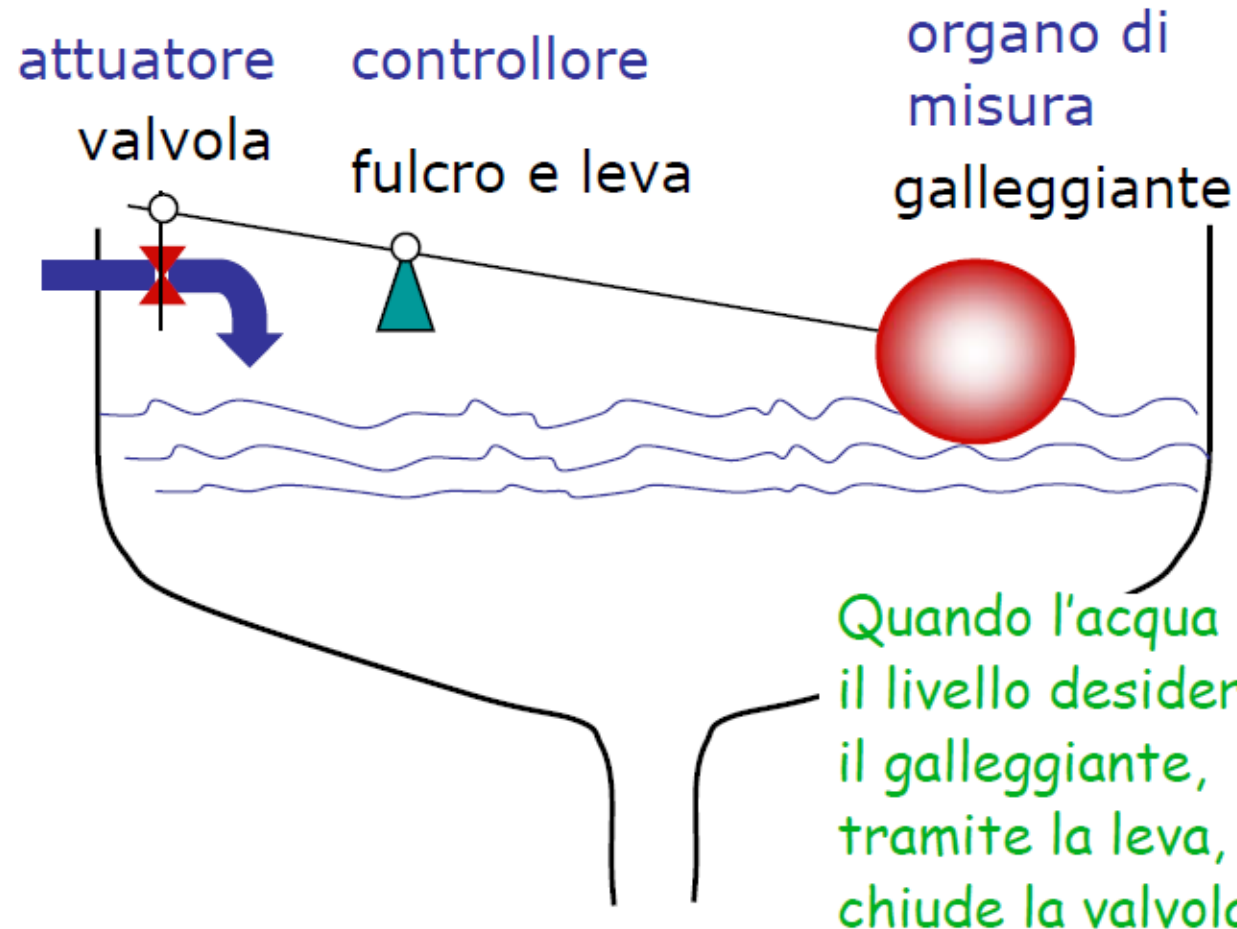
### Regolazione di temperatura in un ambiente



- $z = T$  (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

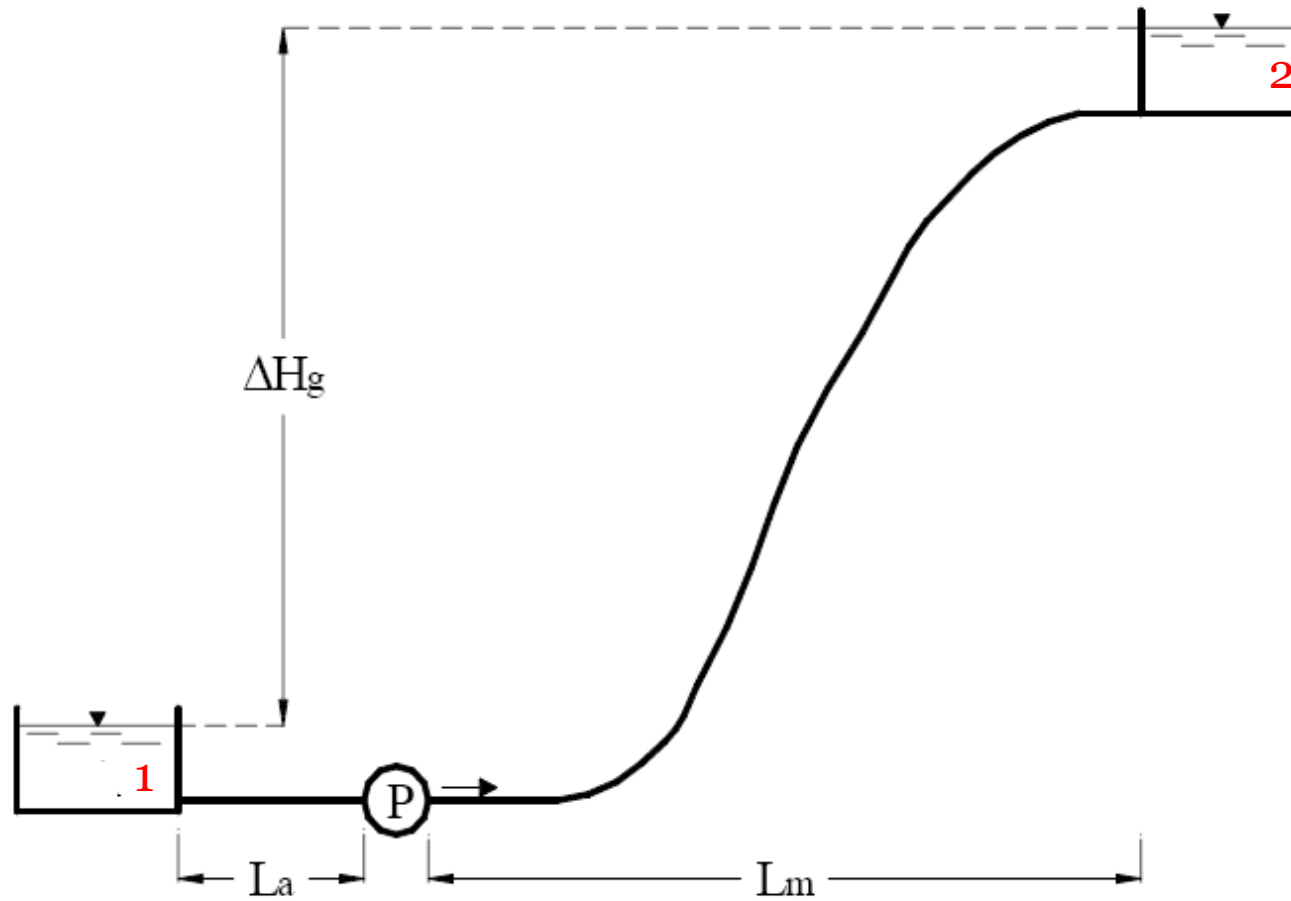
### Cotrollo automatico del livello



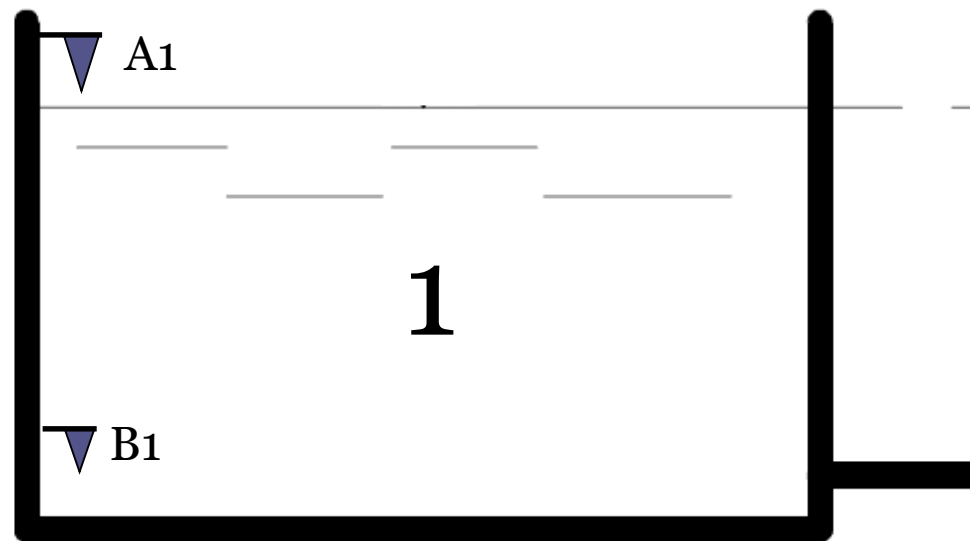
**Tecnologia “meccanica”. Implementazione «analogica» del controllo**

## ESEMPIO

### Impianto di sollevamento

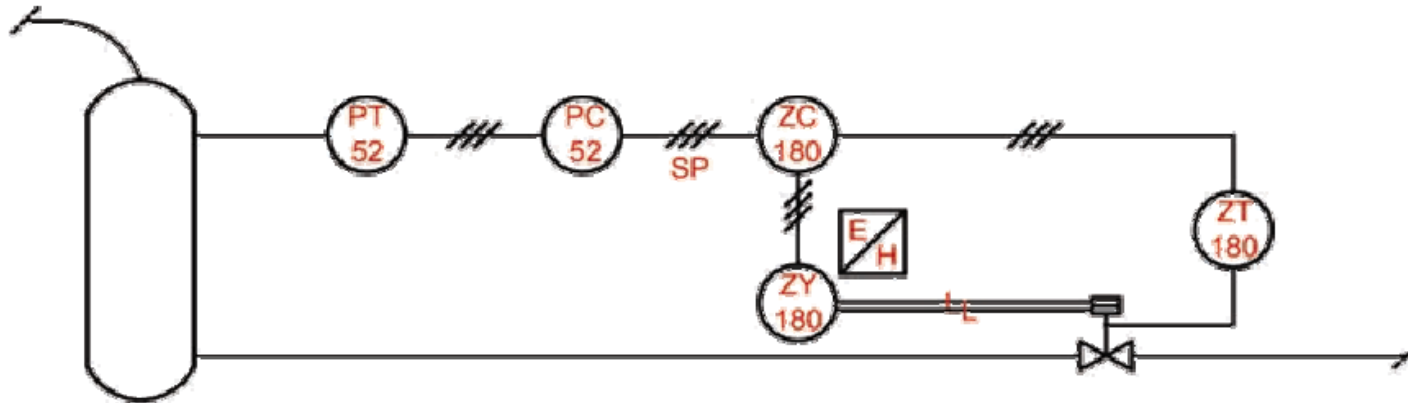


Si controlla la marcia e l'arresto della pompa utilizzando tipicamente misure ON/OFF di livello nei serbatoi.



Logiche “booleane” (PLC)

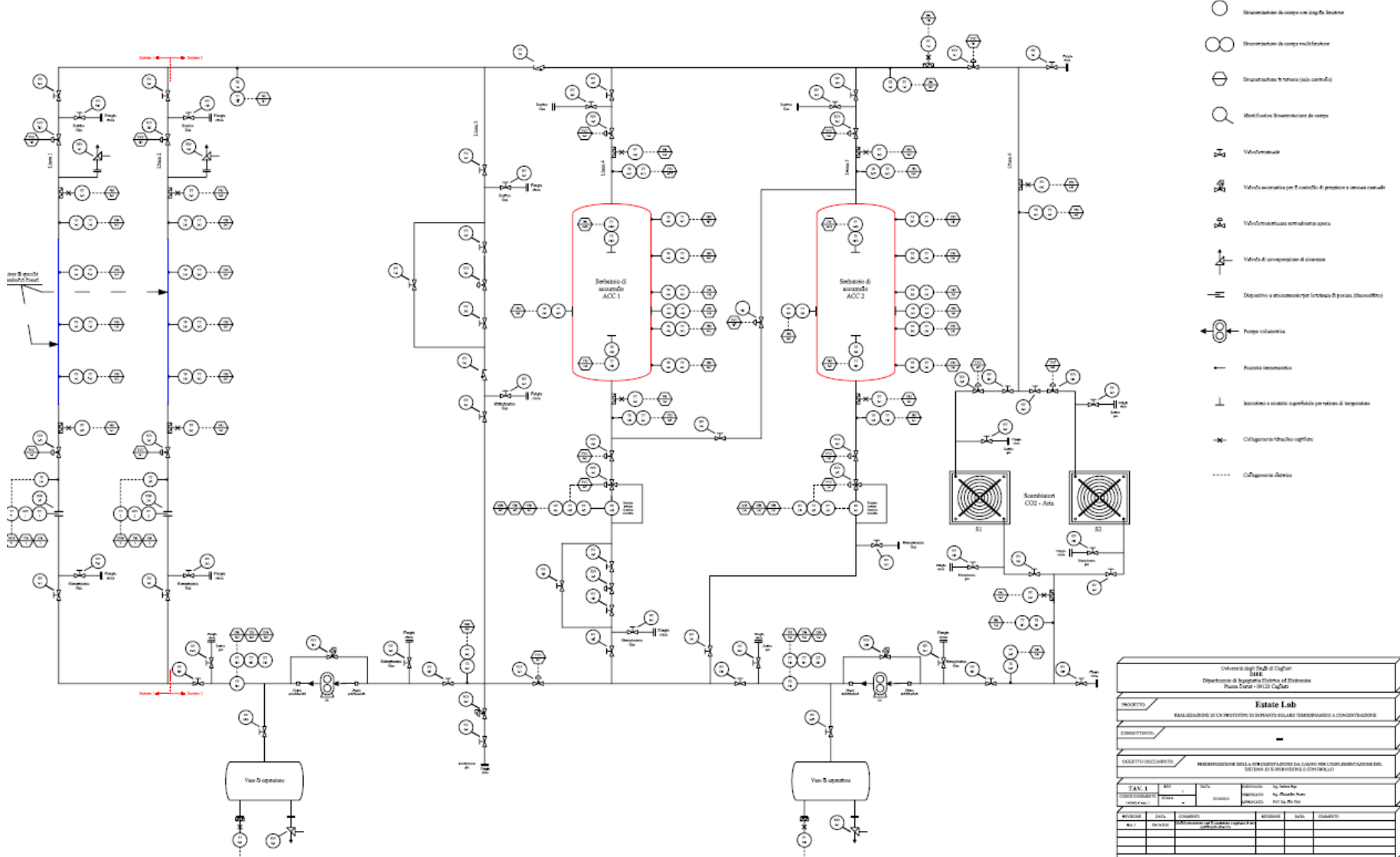
## Rappresentazione dei sistemi di controllo: i diagrammi P&I



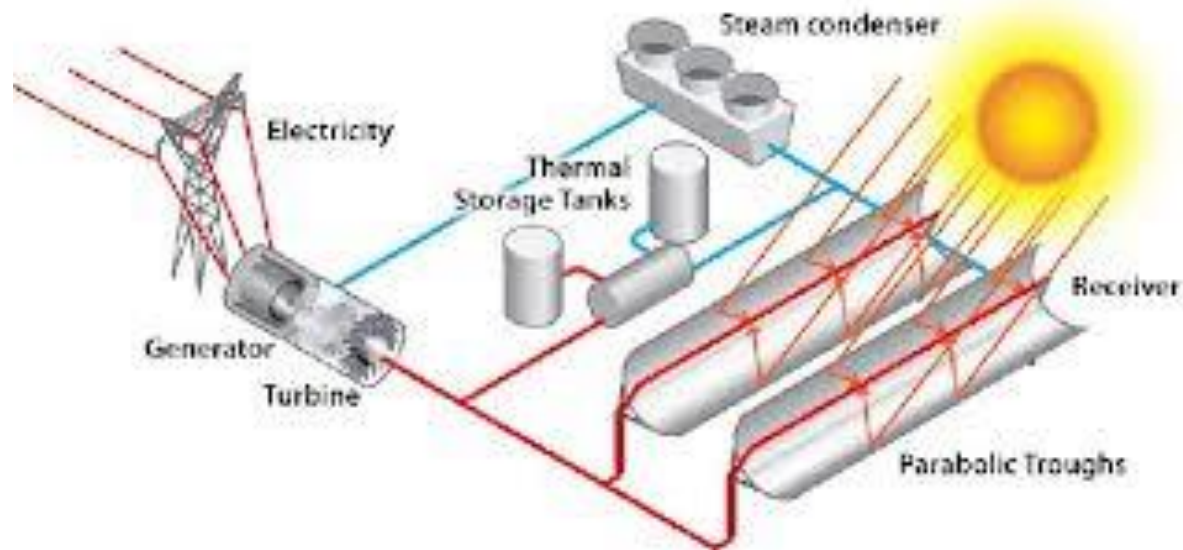
- I diagrammi **Piping and Instrumentation** sono il formalismo più usato per la specifica e documentazione di un sistema di misura e controllo di processo
- I simboli utilizzati sono definiti nello standard ANSI/ISA 55.1-1984 (**Standards and recommended practices for instrumentation and control**)

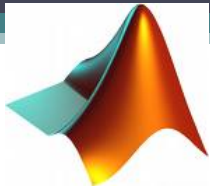
# Impianto solare termodinamico "ESTATE-LAB"

## Diagramma P&I

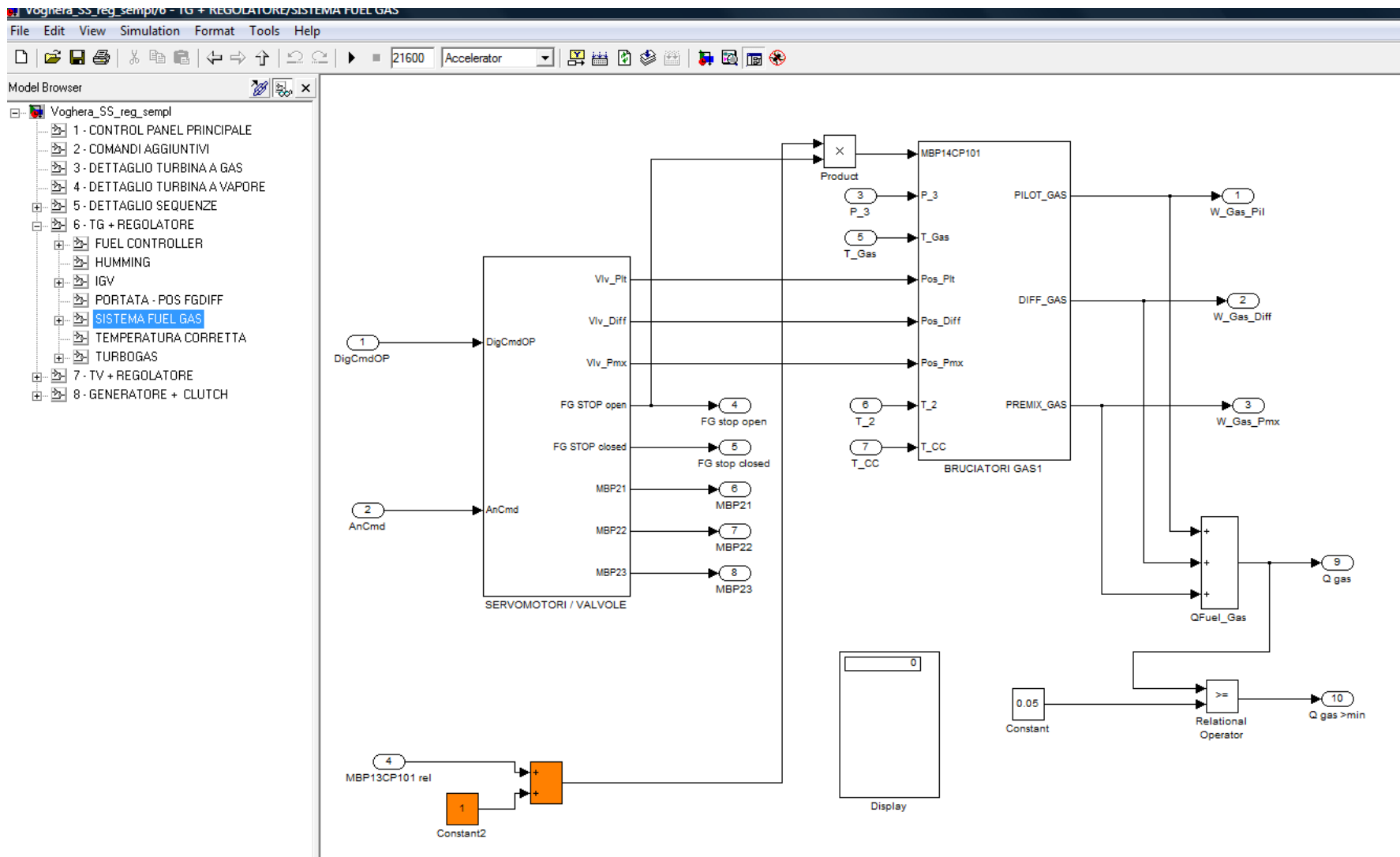


## Impianto solare termodinamico “ESTATE-LAB”





# MATLAB-SIMULINK



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



Dal prompt di Matlab:

**VRMAGLEV**