

## Controlli Automatici

# Schemi avanzati per il controllo di processo. Parte prima

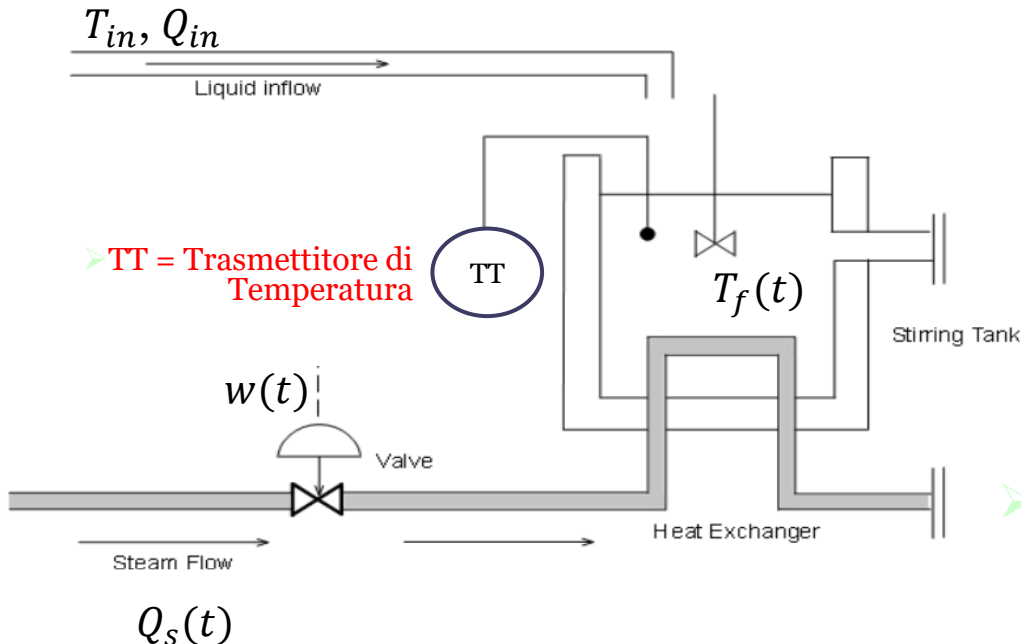
**Prof. Alessandro Pisano**

**apisano@unica.it**

# Controllo in cascata

Capita molto spesso che in un processo siano accessibili per misure oltre alla variabile di uscita anche un certo numero di variabili addizionali che nel legame ingresso-uscita si collocano in **posizione intermedia**. Tali misure aggiuntive possono essere impiegate per realizzare delle architetture più sofisticate rispetto ai sistemi di controllo «a loop singolo» trattati finora.

## Esempio: scambiatore di calore



### ➤ Ingresso manipolabile

*Segnale di comando  $w(t)$  della valvola che modula l'adduzione del vapore ad alta temperatura*

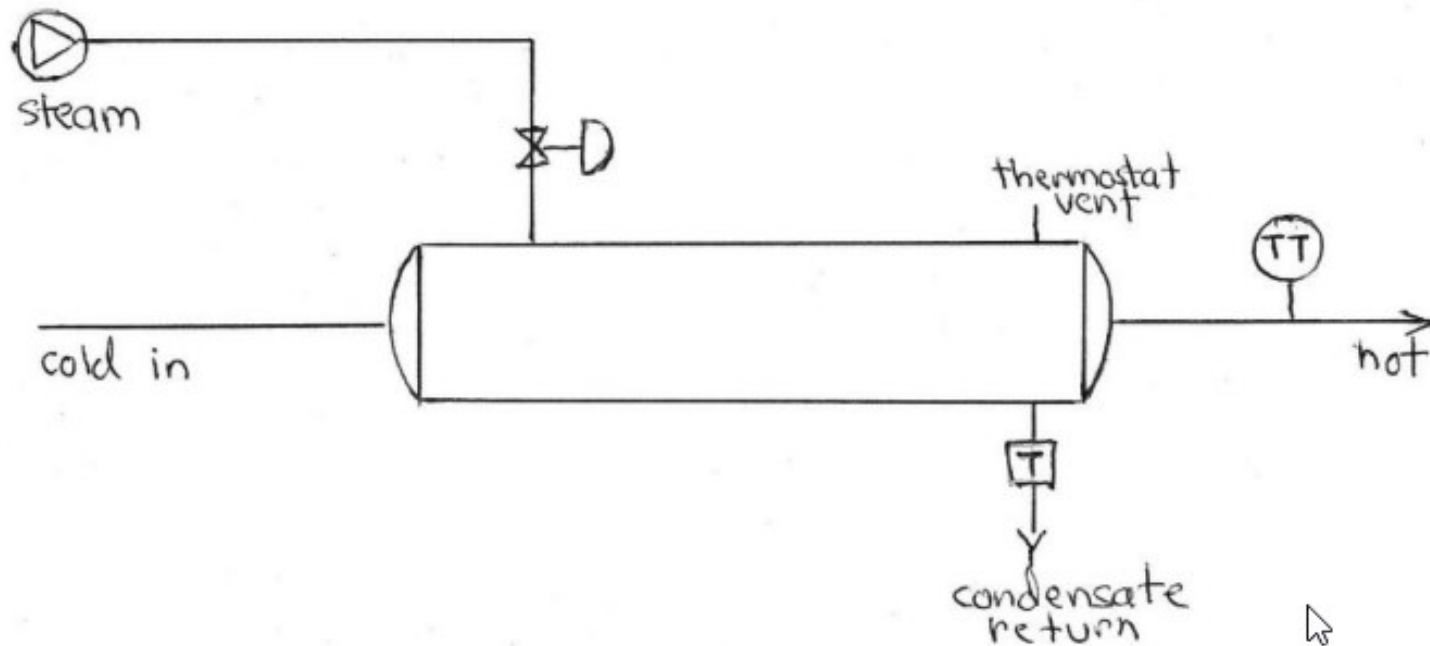
### ➤ Variabile di uscita

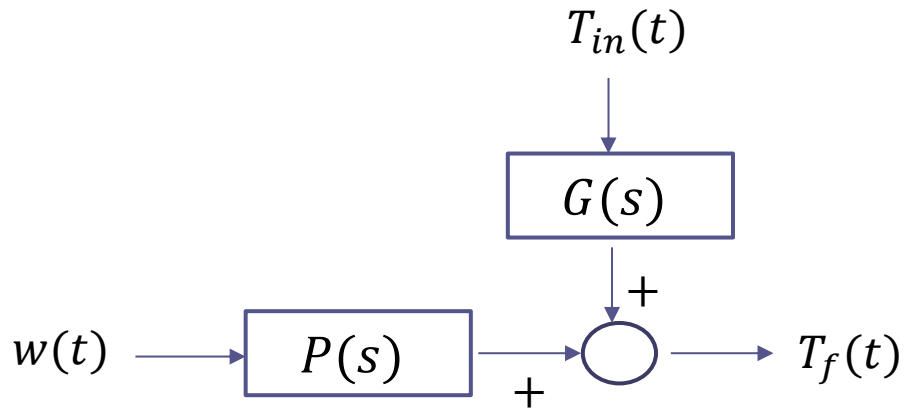
*Temperatura  $T_f(t)$  del liquido nel serbatoio*

### ➤ Ingresso disturbante

*Temperatura  $T_{in}(t)$  del liquido che alimenta il serbatoio*

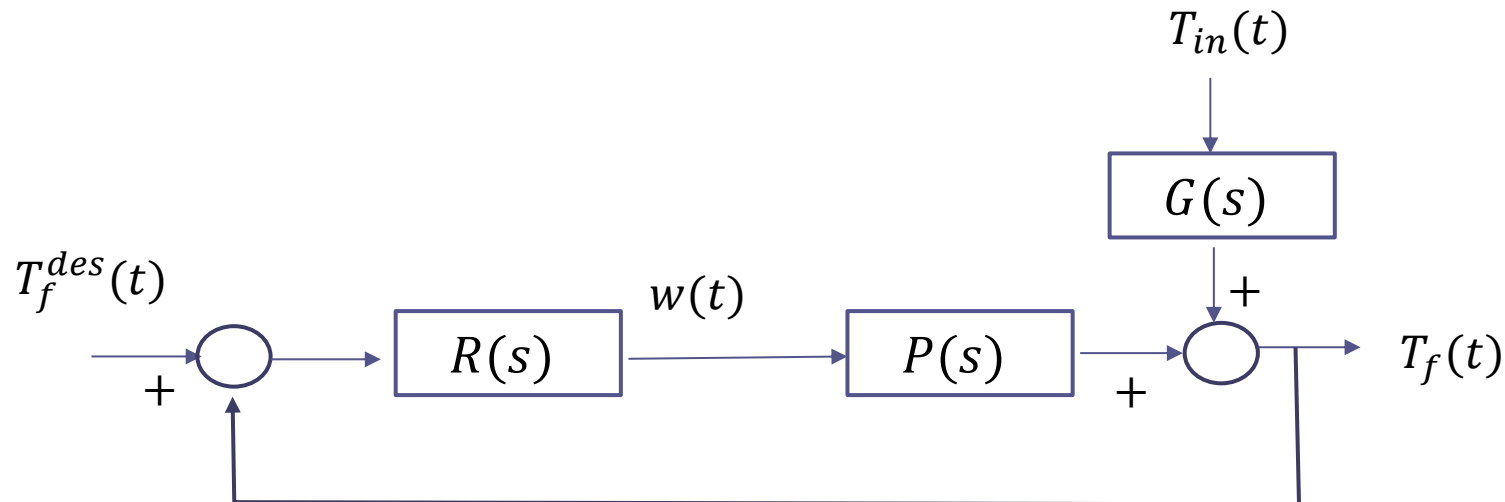
## Scambiatore di calore – una diversa realizzazione



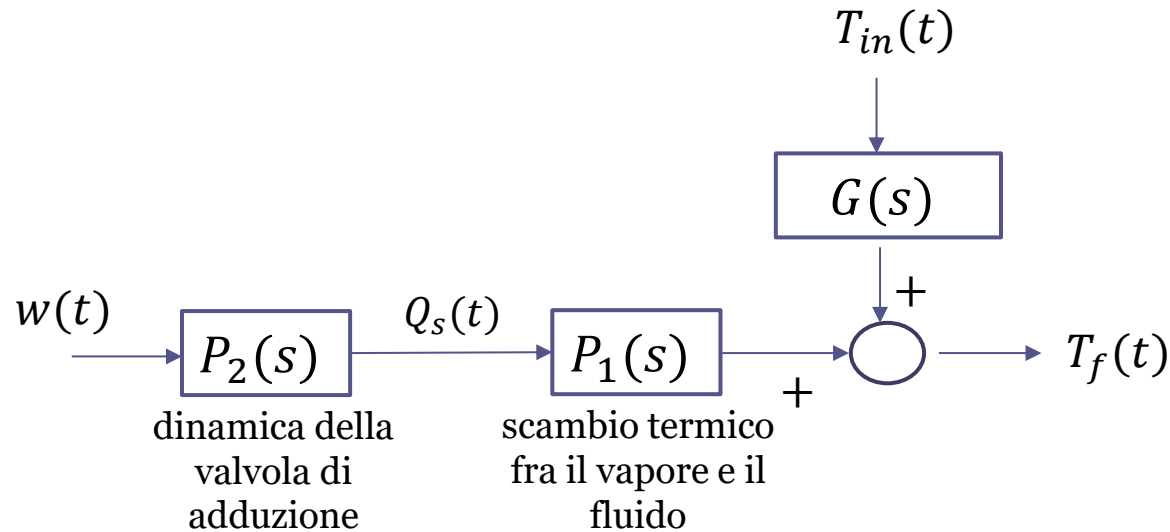


Rappresentazione mediante schema a blocchi.  $P(s)$  include la dinamica della valvola di adduzione del vapore ed i fenomeni di scambio termico fra il vapore e il fluido nel serbatoio.  $G(s)$  include gli effetti della miscelazione fra il fluido contenuto nel serbatoio ed il fluido in ingresso al serbatoio avente temperatura  $T_{in}(t)$

Sulla base di quanto visto fino ad ora, potremmo ipotizzare la seguente configurazione «a loop singolo» per un sistema di controllo dello scambiatore.

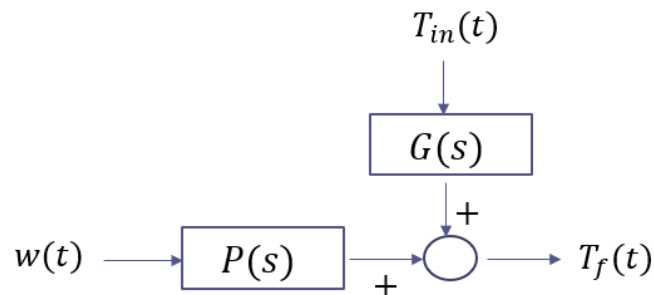


Una variabile **intermedia** misurabile con relativa facilità potrebbe essere la **portata  $Q_s(t)$  del vapore** che transita nella tubazione.



Ovviamente la serie fra i due «sottoprocessi»  $P_1(s)$  e  $P_2(s)$  compone la FdT originale  $P(s)$

$$P(s) = P_2(s)P_1(s)$$

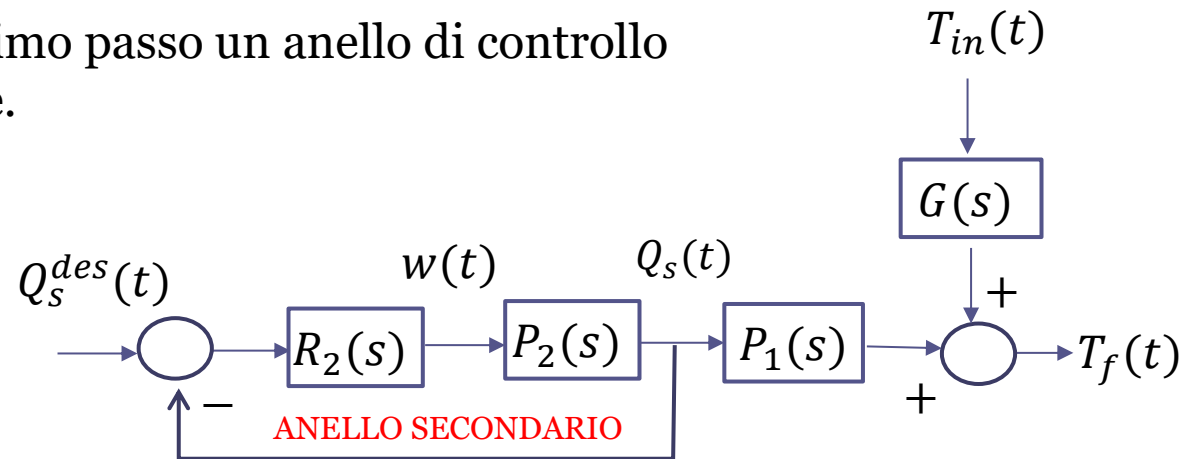


Ciò implica che le due FdT  $P_1(s)$  e  $P_2(s)$  siano inevitabilmente **piu semplici** della FdT complessiva  $P(s)$  (ordine inferiore, e grado relativo inferiore)

Che vantaggi possiamo trarre dalla misura addizionale ?

L'architettura di **controllo in cascata** prevede l'implementazione di **più loop di controllo fra loro annidati**, in cui si retroazionano tutte le variabili misurabili. Vediamo come potrebbe strutturarsi un sistema di controllo in cascata per lo scambiatore di calore dell'esempio.

Viene richiuso come primo passo un anello di controllo della portata del vapore.

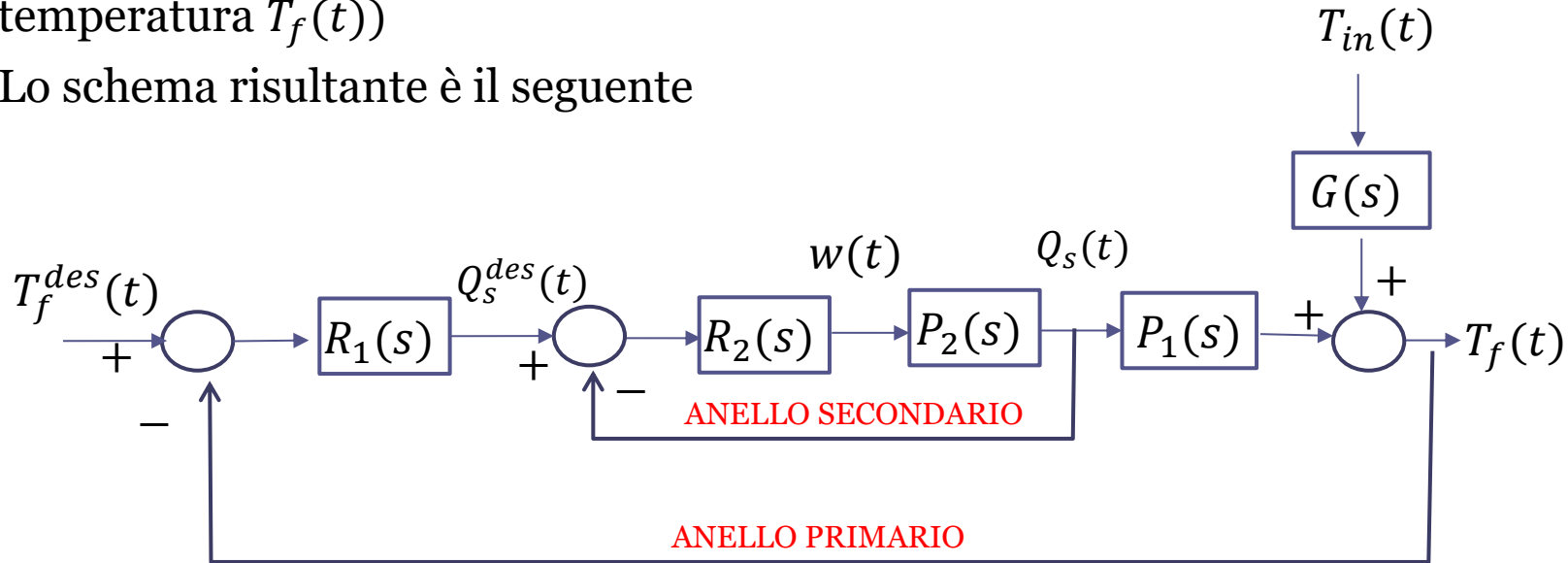


Essendo  $P_2(s)$  più «semplice» rispetto a  $P(s)$  risulta più agevole realizzare un sistema di controllo in retroazione con elevate caratteristiche in termini di precisione, robustezza e velocità di risposta. L'anello interno (in questo caso di portata) si chiama **anello secondario**

**Come se ne determina il set-point  $Q_s^{des}(t)$  ?**

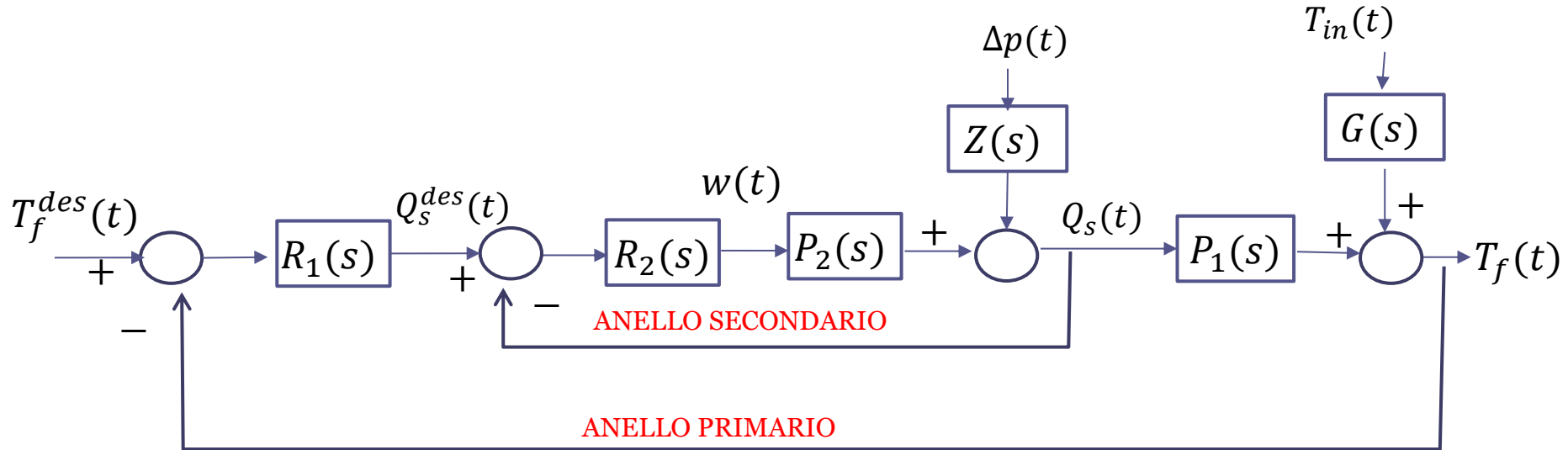
Il set-point  $Q_s^{des}(t)$  dell'anello secondario di portata viene generato da un ulteriore anello di controllo che viene richiuso esternamente (e che viene denominato **anello primario**) in cui viene retroazionata l'uscita di interesse (in questo caso la temperatura  $T_f(t)$ )

Lo schema risultante è il seguente



Lo schema in cascata consente di migliorare le prestazioni del sistema di controllo soprattutto per quanto concerne le proprietà di reiezione dei disturbi.

Una caratterizzazione maggiormente approfondita del processo in esame porterebbe ad individuare altre significative grandezze disturbanti. Ad esempio, variazioni di pressione  $\Delta p(t)$  nella linea di adduzione del vapore si traducono in un disturbo sulla portata  $Q_s(t)$



Un sistema di controllo in cascata è in grado di fronteggiare e compensare i disturbi sull'anello secondario in maniera molto più efficace rispetto ad un sistema di controllo ad anello singolo.

Esso implementa in qualche modo il paradigma del «**divide et impera**». L'anello secondario gestisce il sottoprocesso  $P_2(s)$  ed opera la compensazione degli effetti del disturbo  $\Delta p(t)$ . L'anello primario gestisce invece il sottoprocesso  $P_1(s)$  ed opera la compensazione degli effetti del disturbo  $T_{in}(t)$

**Quali linee guida devono essere seguite nel progetto dei due regolatori  $R_1(s)$  ed  $R_2(s)$  affinché il principio del «divide et impera» funzioni correttamente ed il sistema di controllo in cascata abbia prestazioni soddisfacenti ?**

Il principale requisito che deve essere garantito è che **l'anello secondario sia più «pronto» rispetto all'anello primario.**

### **Che significa nel concreto?**

Per sistemi di controllo in cui siano unicamente coinvolte FdT algebriche (cioè non contenenti termini di ritardo) ciò può tradursi nella richiesta che i poli dominanti del sistema in retroazione associato all'anello secondario siano «sufficientemente più in alta frequenza» (almeno 5 volte) rispetto ai poli dominanti associati al primario.

Per coprire situazioni di carattere più generale in cui, ad esempio, il processo è descritto da un modello FOPDT, il requisito di «prontezza» può essere caratterizzata in maniera diversa, non sulla base della posizione nel piano dei poli del sistema a ciclo chiuso ma bensì ricorrendo a particolari proprietà della funzione di risposta armonica del processo e del controllore.

Tale proprietà prende il nome di «banda passante».

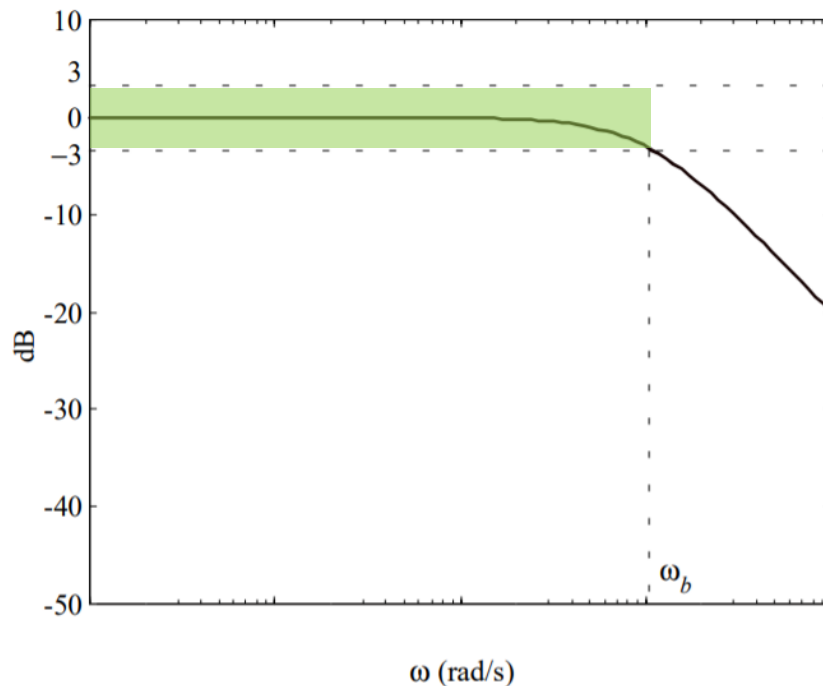
## Banda passante

La banda passante è una grandezza che si associa a sistemi dinamici asintoticamente stabili (ad esempio ai sensori o agli attuatori) e, in prevalenza, ai sistemi di controllo in retroazione.

In un sistema di controllo in retroazione la banda passante  $\omega_b$  viene letta nei **diagrammi di Bode della FdT a ciclo chiuso  $W_r^y(s)$  fra il set point e l'uscita.**

E' la pulsazione  $\omega_b$  tale che

$$|W_r^y(j\omega)| \leq |W_r^y(j0)| - 3dB \quad \forall \omega > \omega_b$$



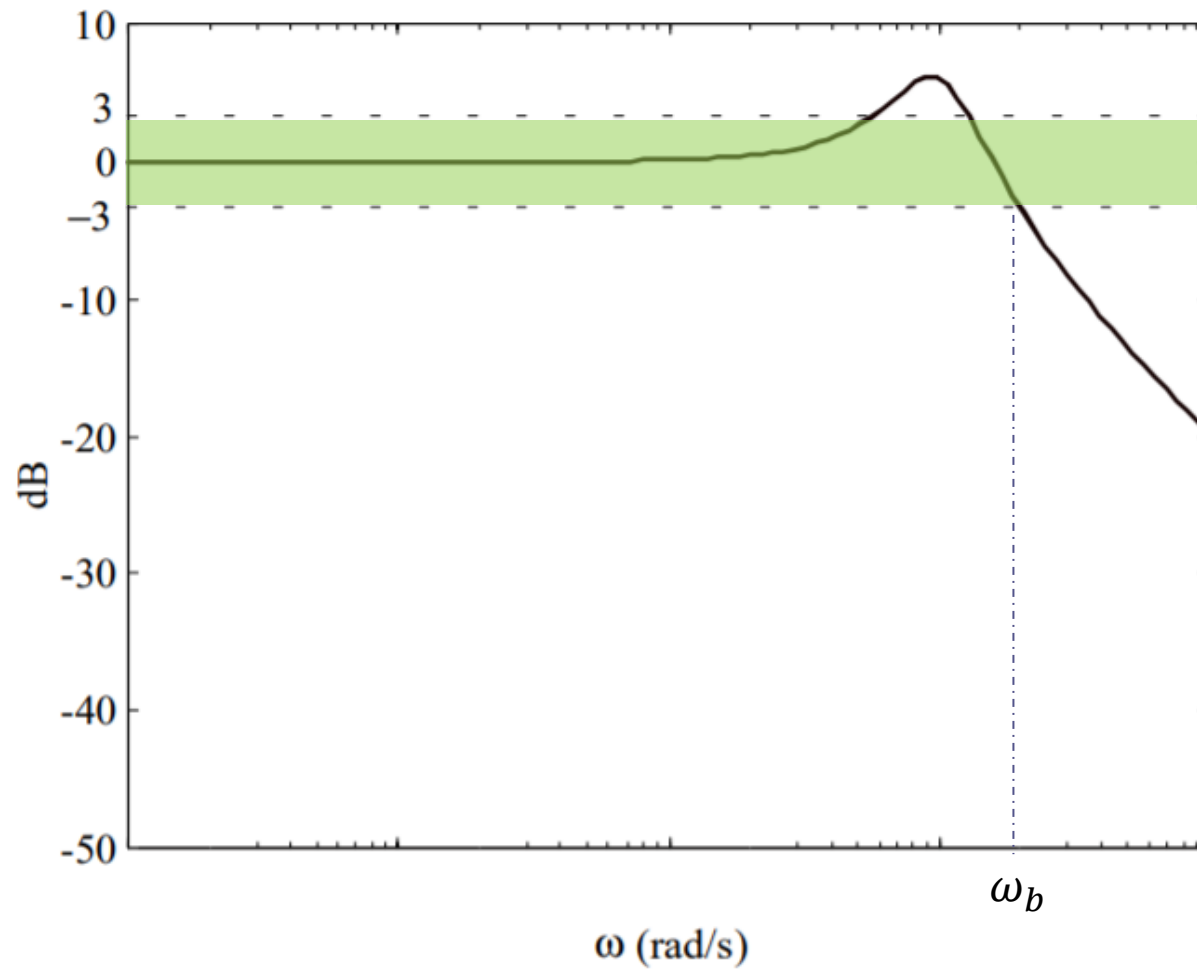
Il valore equivalente in Hz viene denotato come **B3**.

La banda passante è un indicatore delle **proprietà filtranti** di un sistema di controllo ma anche della sua **prontezza di risposta**

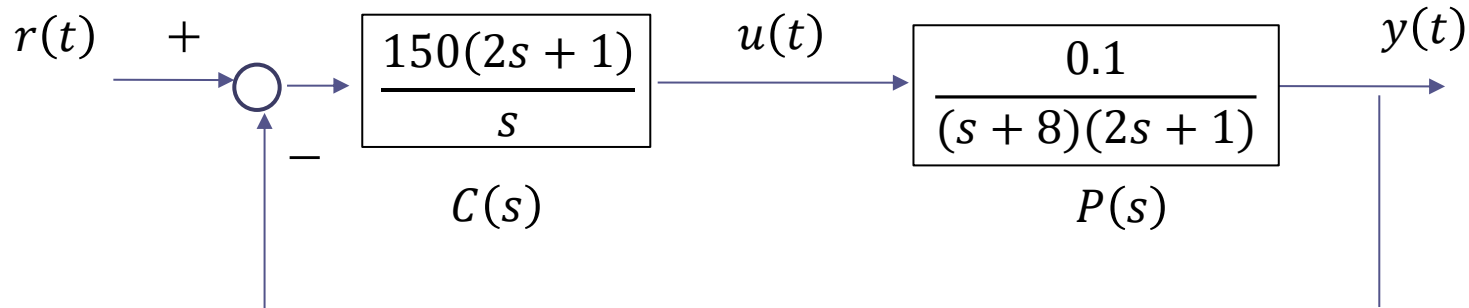
Tipico diagramma di Bode dei moduli di una FdT a ciclo chiuso fra il set point e l'uscita

**L'uscita replica con ampiezza pressoché inalterata tutti i set-point con frequenza interna alla banda passante.**

Banda passante nel caso di FdT a ciclo chiuso avente una **risonanza**



## Esempio

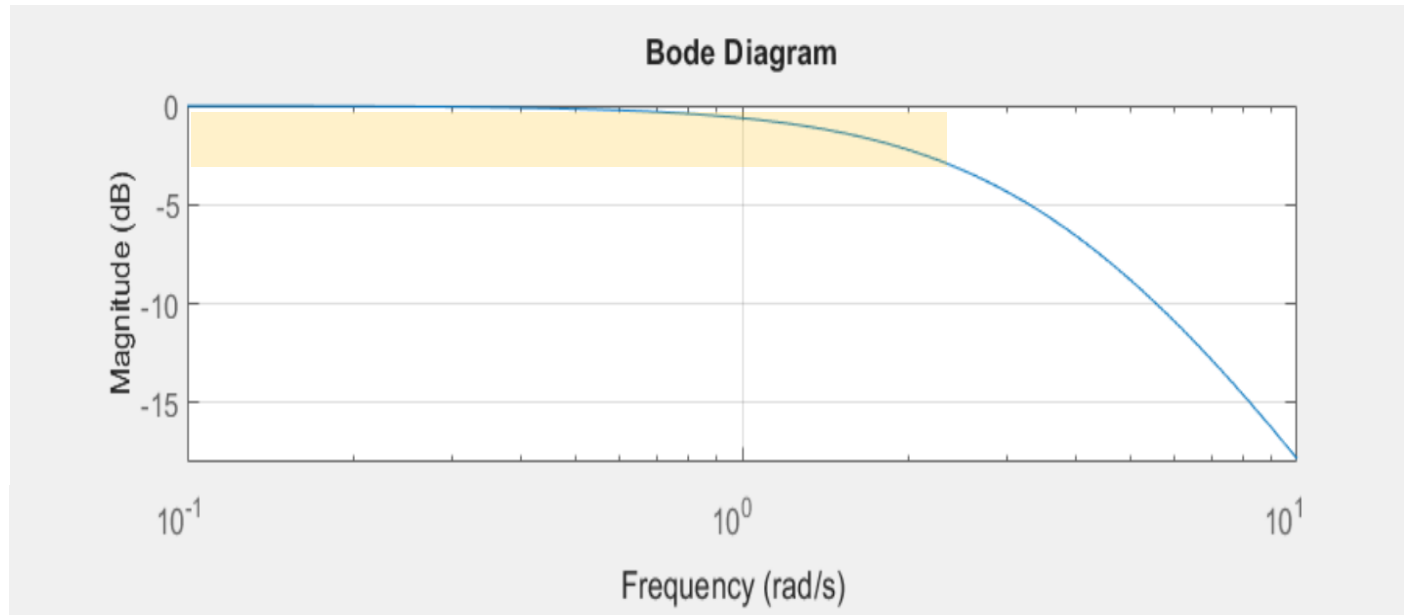


Le FdT a ciclo chiuso fra il set point e l'uscita è la seguente

$$W_r^y(s) = \frac{C(s)P(s)}{1+C(s)P(s)} = \frac{\frac{150(2s+1)}{s} \cdot \frac{0.1}{(s+8)(2s+1)}}{1 + \frac{150(2s+1)}{s} \cdot \frac{0.1}{(s+8)(2s+1)}} = \frac{\frac{150 \cdot 0.1}{s(s+8)}}{1 + \frac{150 \cdot 0.1}{s(s+8)}} = \frac{15}{s(s+8)+15}$$

*FdT a ciclo chiuso set – point uscita*

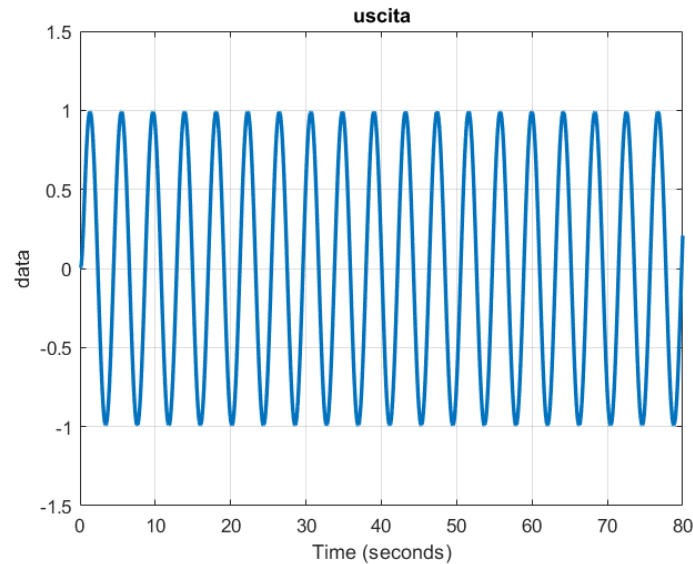
$$W_r^y(s)$$



Il sistema di controllo ha una banda passante  $\omega_b$  intorno ai 2.5 rad/secondo

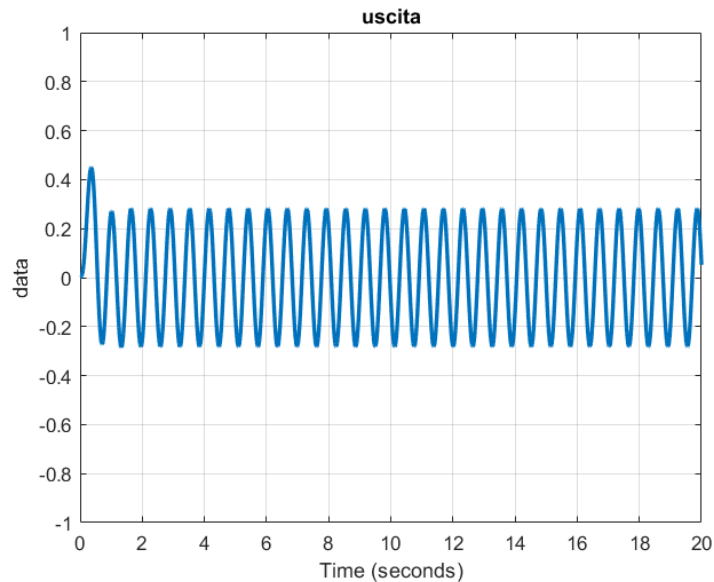
Nella successiva slide vediamo alcuni risultati simulativi in merito all'applicazione di set point sinusoidali aventi frequenza interna alla banda passante o esterna

$$r(t) = \sin(1.5t)$$



Set point **in banda**  
**passante** viene  
 riprodotto con la  
 medesima ampiezza

$$r(t) = \sin(10t)$$



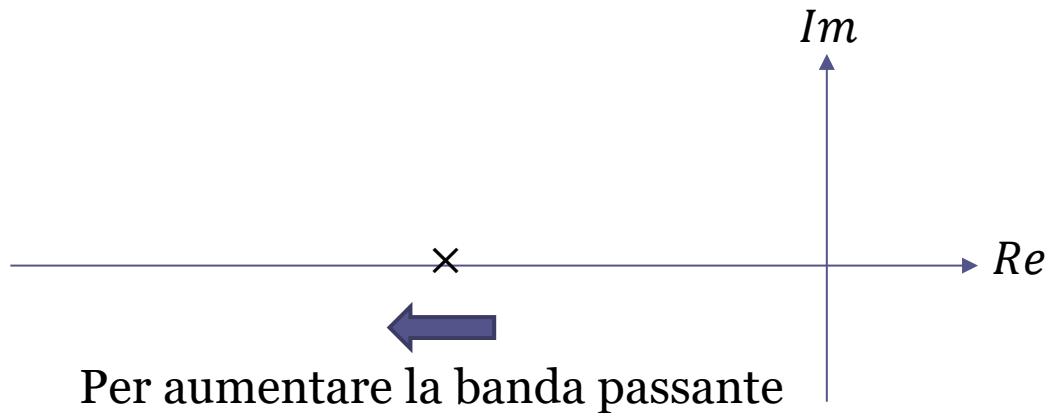
Set point **fuori banda**  
**passante** viene attenuato  
 in ampiezza in maniera  
 significativa

## Banda passante di sistemi STC

$$G_1(s) = \frac{\mu}{1 + sT}$$

$$\omega_b = \frac{1}{T}$$

La banda passante aumenta se si riduce al costante di tempo  $T$  del polo (cioè se il polo si sposta verso le alte frequenze)

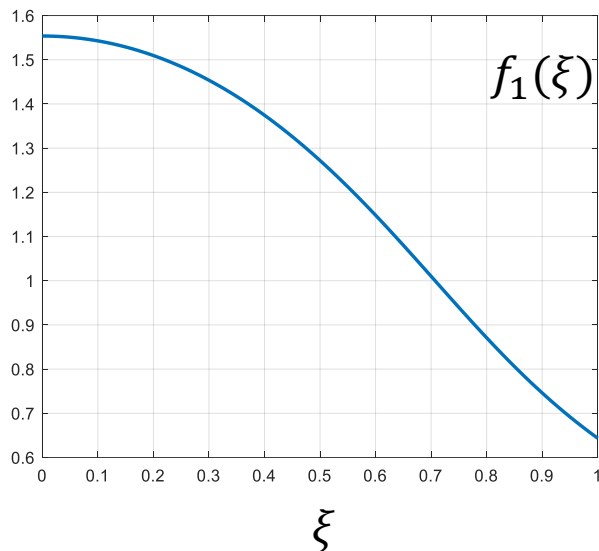


Anche se sono presenti **più poli reali**, la loro traslazione verso le alte frequenze produce un aumento della banda passante

## Banda passante di sistemi del secondo ordine

$$G_2(s) = \frac{\mu\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\omega_b = \omega_n \sqrt{1 - 2\xi^2 + \sqrt{2 - 4\xi^2 + 4\xi^4}} = \omega_n f_1(\xi)$$



La banda passante è **direttamente proporzionale alla pulsazione naturale**, ed esibisce un certo grado di dipendenza anche dallo smorzamento, caratterizzato dal grafico a sinistra.

## Banda passante di sistemi del secondo ordine con due poli reali coincidenti

Si deduce dal precedente caso generale ponendo  $\xi = 1$

$$G_3(s) = \frac{\mu\omega_n^2}{(s + \omega_n)^2} = \frac{\mu}{(Ts + 1)^2}$$

$$T = \frac{1}{\omega_n}$$

$$\omega_b = \omega_n f_1(\xi) \approx 0.65\omega_n = \frac{0.65}{T}$$

**La banda passante  $\omega_b$  di un sistema di controllo in retroazione è strettamente correlata alla pulsazione di attraversamento  $\omega_t$  della FdT a ciclo aperto  $C(s)P(s)$**

Si può ipotizzare, con ragionevole **approssimazione**, che

$$\omega_b \approx \omega_t$$

E' un legame che mette in relazione una grandezza propria del sistema a ciclo chiuso (la banda passante, che si legge nei diagrammi di Bode della FdT a ciclo chiuso) con una grandezza associata alla FdT a ciclo aperto (la pulsazione di attraversamento, che si legge nei diagrammi di Bode della FdT a ciclo aperto)

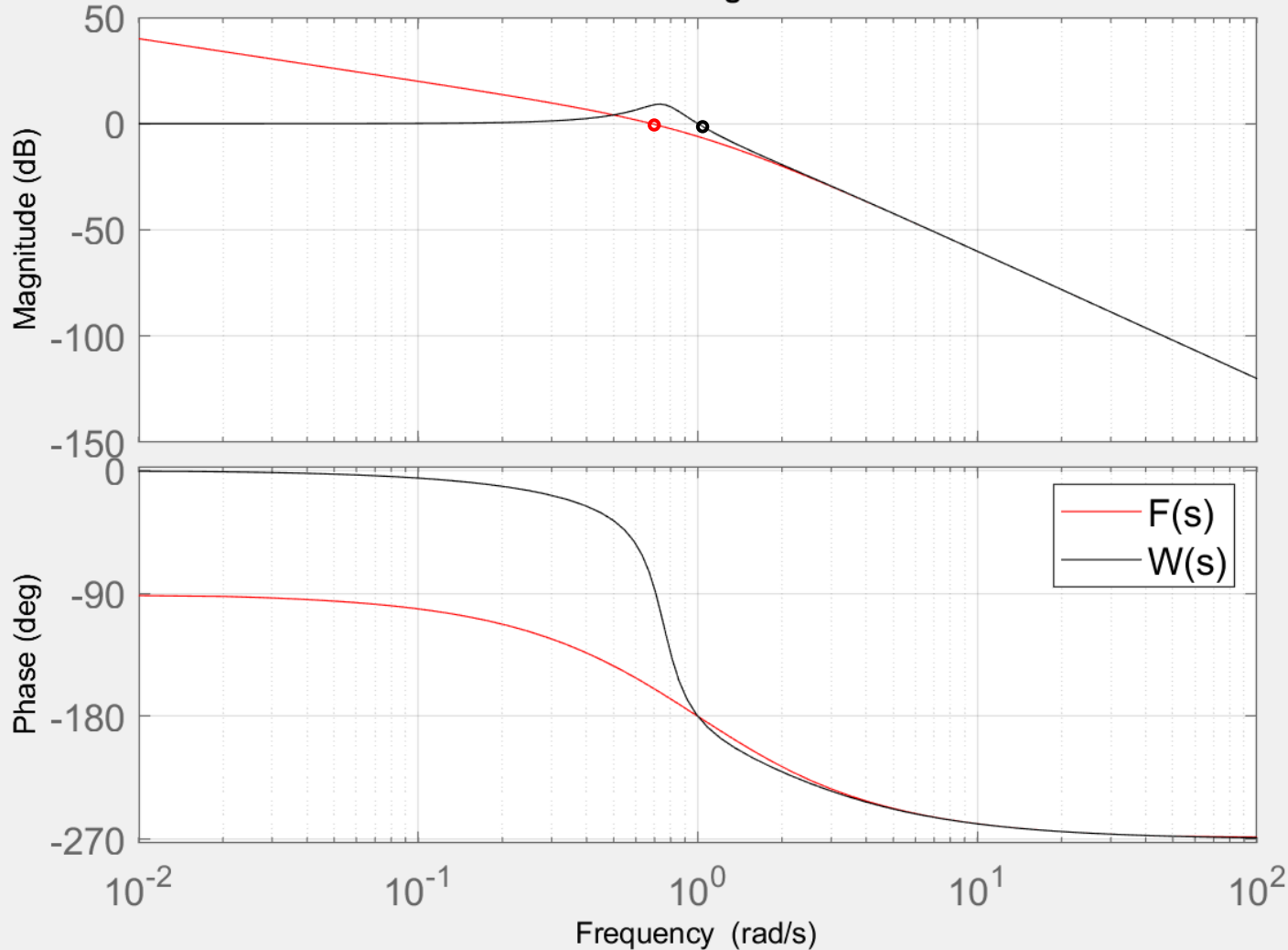
In realtà, la  $\omega_b$  risulta in genere essere un po' maggiore della  $\omega_t$

**Esempio**

$$A(s) = C(s)P(s) = \frac{1}{s(s+1)^2}$$

$$W_r^y(s) = \frac{A(s)}{1+A(s)} = \frac{1}{s(s+1)^2+1}$$

**Bode Diagram**

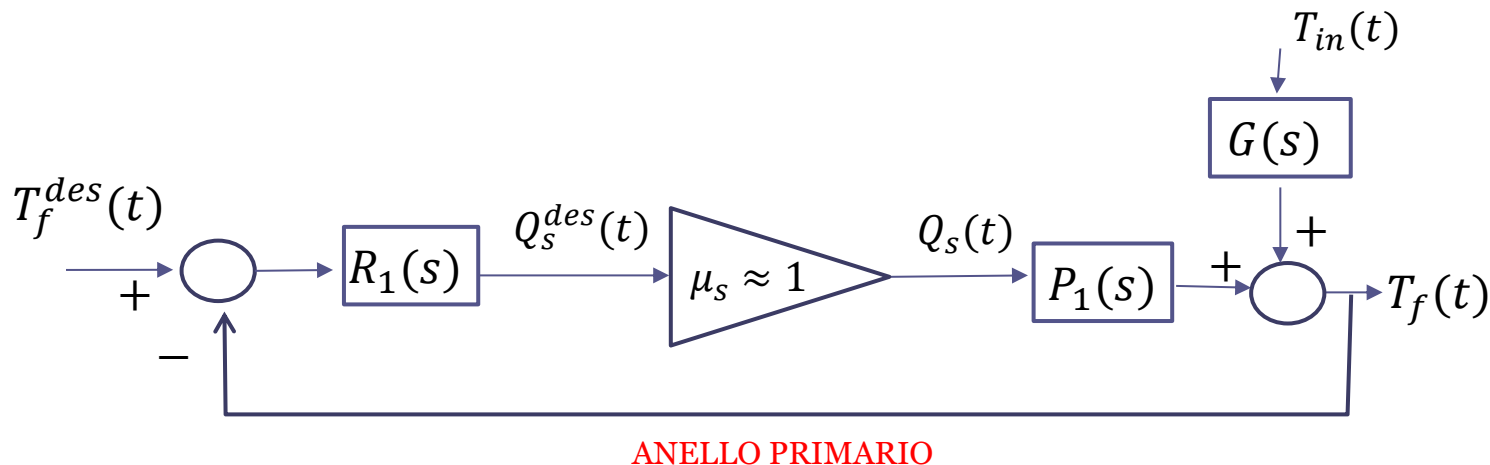


$$\omega_t \approx 0.7 \text{ rad/s}$$

$$\omega_b \approx 1 \text{ rad/s}$$

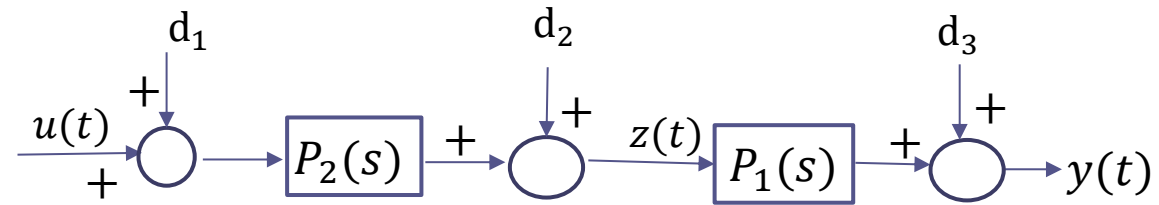
Una formulazione generale del requisito principale di progetto che deve essere garantito in un sistema di controllo in cascata può esprimersi attraverso il concetto di **banda passante**, richiedendo che **l'anello secondario abbia una banda passante sufficientemente superiore** (almeno **5 volte**) rispetto a quella dell'anello primario.

Se tale requisito è garantito, l'anello secondario opera all'interno della banda passante dell'anello primario come se fosse un blocco **istantaneo** in cui vale la relazione  $Q_s(t) \approx Q_s^{des}(t)$ . Il regolatore  $R_1(s)$  dell'anello primario può pertanto essere progettato riferendosi al solo sottoprocesso  $P_1(s)$  (cioè considerando istantaneo l'anello secondario). Come risultato, **i disturbi agenti sull'anello secondario vengono compensati in maniera molto più efficace rispetto alla architettura ad anello singolo**, ciò grazie alle superiori caratteristiche dinamiche dell'anello secondario.

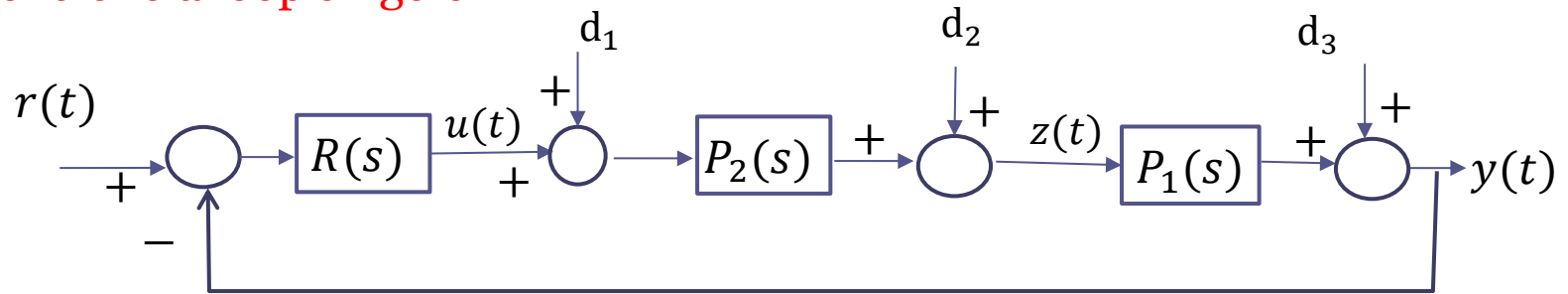


## In termini più generali:

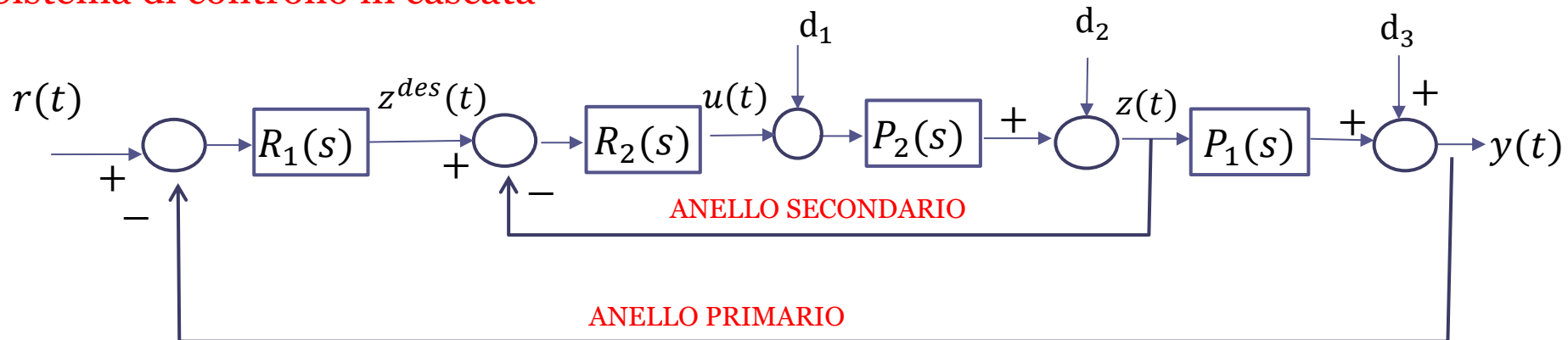
### Sistema a ciclo aperto



### Sistema di controllo a loop singolo



### Sistema di controllo in cascata



## Sistema di controllo a loop singolo

$$W_r^y(s) = \frac{R(s)P_2(s)P_1(s)}{1 + R(s)P_2(s)P_1(s)}$$

$$W_{d_1}^y(s) = \frac{P_2(s)P_1(s)}{1 + R(s)P_2(s)P_1(s)}$$

$$W_{d_2}^y(s) = \frac{P_1(s)}{1 + R(s)P_2(s)P_1(s)}$$

$$W_{d_3}^y(s) = \frac{1}{1 + R(s)P_2(s)P_1(s)}$$

## Sistema di controllo in cascata

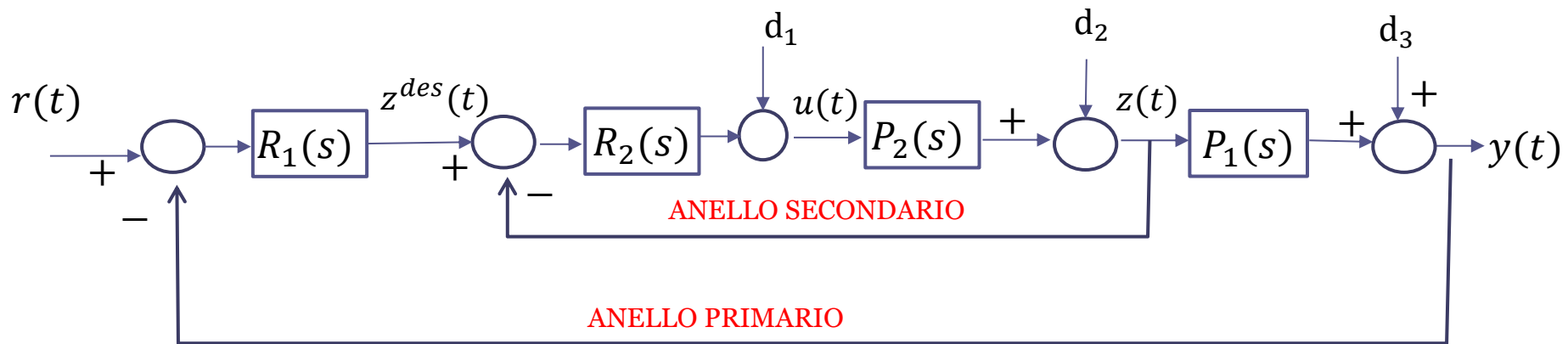
$$W_r^y(s) = \frac{R_1(s)W_{zdes}^z(s)P_1(s)}{1 + R_1(s)W_{zdes}^z(s)P_1(s)}$$

$$W_{zdes}^z(s) = \frac{R_2(s)P_2(s)}{1 + R_2(s)P_2(s)}$$

$$W_{d_1}^y(s) = \frac{1}{1 + R_2(s)P_2(s)} \cdot \frac{P_2(s)P_1(s)}{1 + R_1(s)W_{zdes}^z(s)P_1(s)}$$

$$W_{d_2}^y(s) = \frac{1}{1 + R_2(s)P_2(s)} \cdot \frac{P_1(s)}{1 + R_1(s)W_{zdes}^z(s)P_1(s)}$$

$$W_{d_3}^y(s) = \frac{1}{1 + R_1(s)W_{zdes}^z(s)P_1(s)}$$



$$W_{z^{des}}^z(s) = \frac{R_2(s)P_2(s)}{1 + R_2(s)P_2(s)}$$

FdT a ciclo chiuso dell'anello secondario

$$W_r^y(s) = \frac{R_1(s)W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)}{1 + R_1(s)W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)}$$

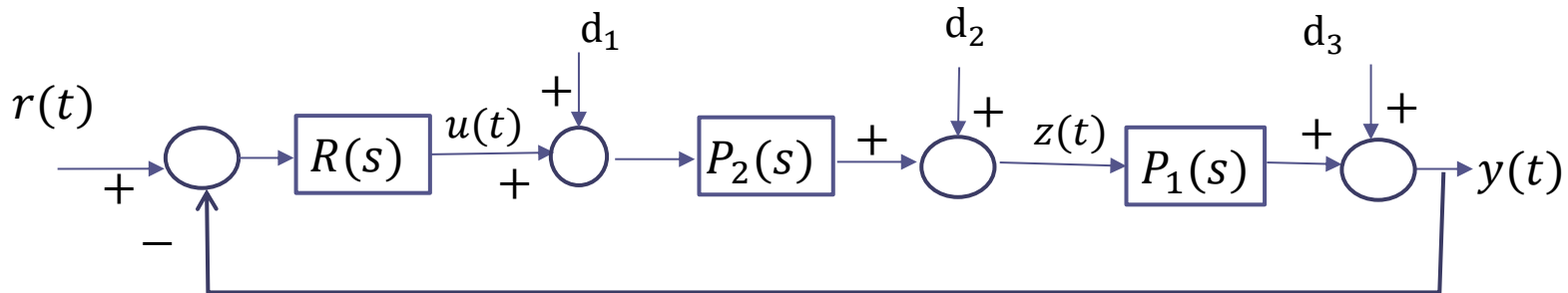
FdT a ciclo chiuso dell'anello primario

Sotto l'approssimazione  $W_{z^{des}}^z(s) \approx 1$  si ha:

$$W_r^y(s) \approx \frac{R_1(s)P_1(s)}{1 + R_1(s)P_1(s)}$$

**Approfondimento:** derivazione delle FdT a ciclo chiuso set-point uscita e disturbi-uscita in un sistema di controllo a loop singolo ed in un sistema di controllo in cascata.

### Sistema di controllo a loop singolo



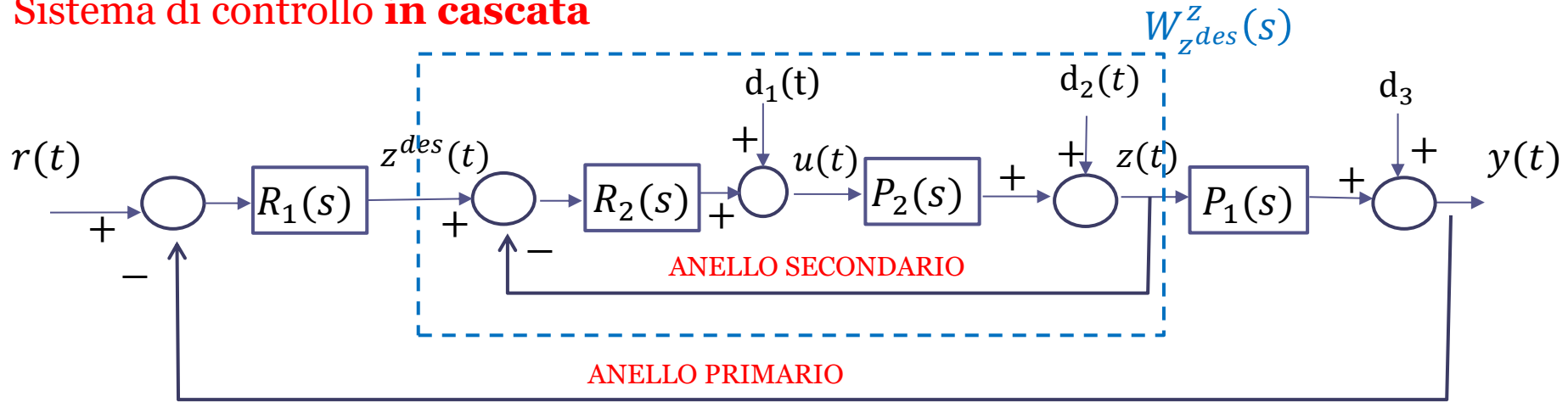
$$W_r^y(s) = \frac{R(s)P_2(s)P_1(s)}{1 + R(s)P_2(s)P_1(s)}$$

$$W_{d_1}^y(s) = \frac{P_2(s)P_1(s)}{1 + R(s)P_2(s)P_1(s)}$$

$$W_{d_2}^y(s) = \frac{P_1(s)}{1 + R(s)P_2(s)P_1(s)}$$

$$W_{d_3}^y(s) = \frac{1}{1 + R(s)P_2(s)P_1(s)}$$

## Sistema di controllo in cascata



$$W_r^y(s) = \frac{R_1(s)W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)}{1 + R_1(s)W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)}$$

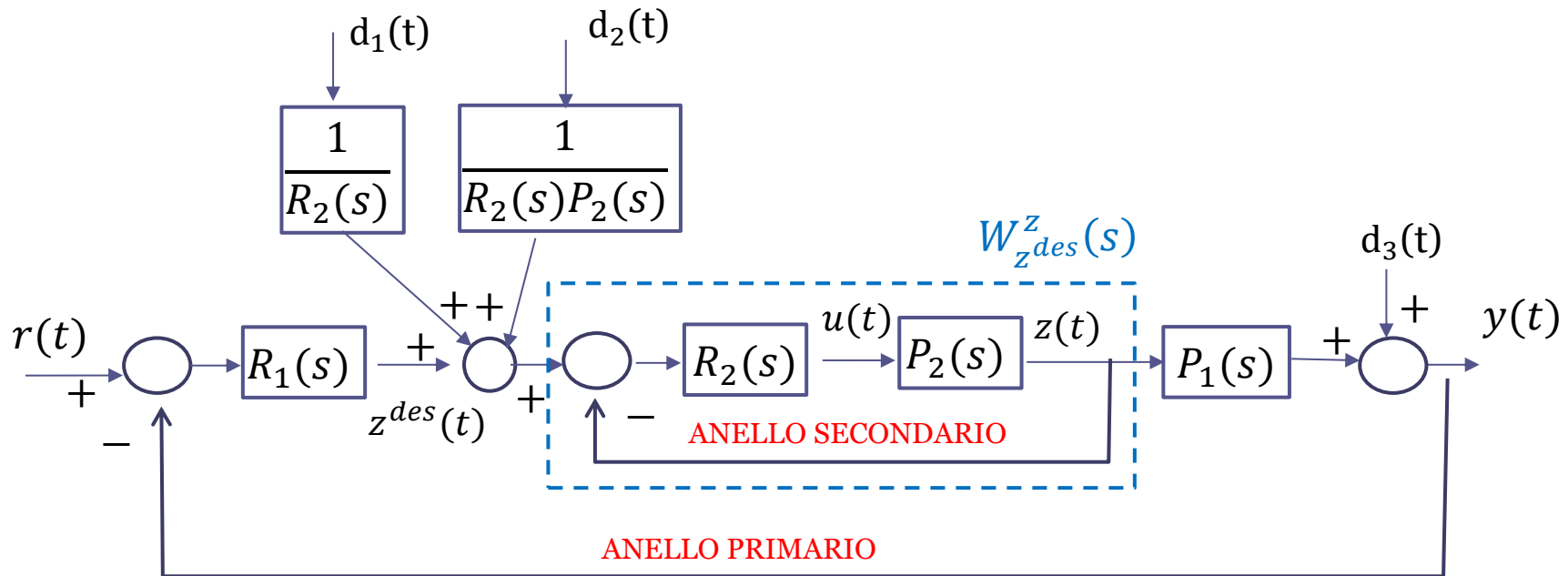
$$W_{z^{des}}^z(s) = \frac{R_2(s)P_2(s)}{1 + R_2(s)P_2(s)}$$

$$W_{d_1}^y(s) = \frac{1}{R_2(s)} \cdot \frac{W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)}{1 + W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)R_1(s)} = \frac{1}{1 + R_2(s)P_2(s)} \cdot \frac{P_2(s)P_1(s)}{1 + R_1(s)W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)}$$

$$W_{d_2}^y(s) = \frac{1}{R_2(s)P_2(s)} \cdot \frac{W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)}{1 + W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)} = \frac{1}{1 + R_2(s)P_2(s)} \cdot \frac{P_1(s)}{1 + R_1(s)W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)}$$

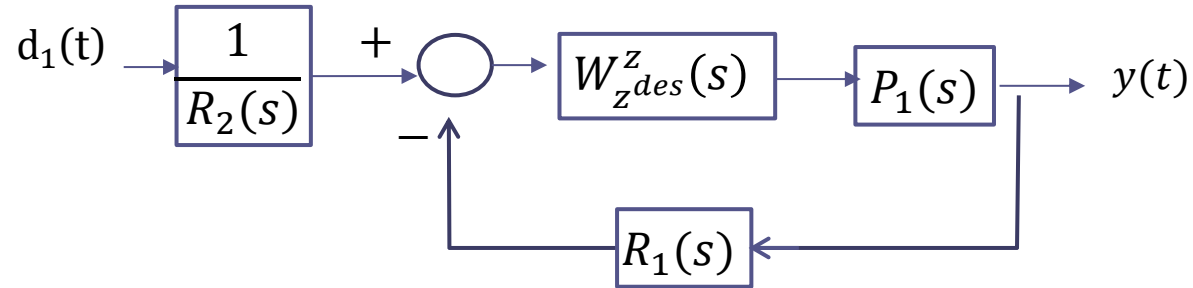
$$W_{d_3}^y(s) = \frac{1}{1 + R_1(s)W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)}$$

La seguente rappresentazione equivalente, in cui il punto di inserzione dei disturbi  $d_1(t)$  e  $d_2(t)$  è traslato a monte dell'anello secondario, consente di derivare più agevolmente le relative FdT a ciclo chiuso  $W_{d_1}^y(s)$  e  $W_{d_2}^y(s)$  riportate nella precedente slide

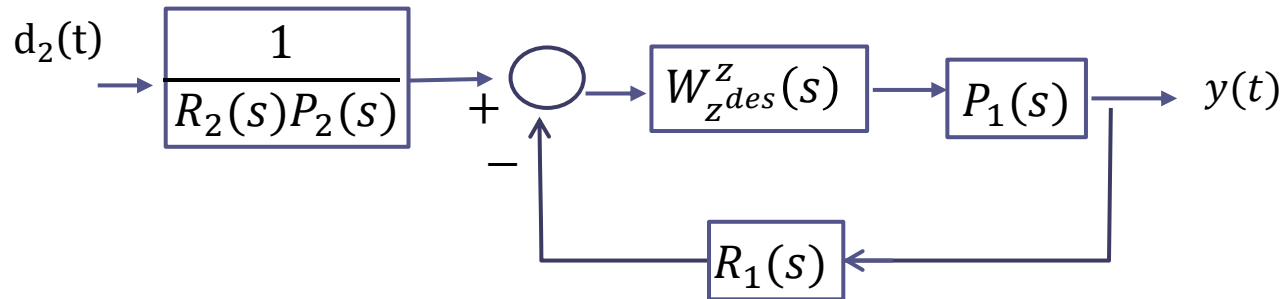


Nella successiva slide lo schema viene ulteriormente elaborato e semplificato. In particolare si riportano **tre schemi distinti** ciascuno dei quali evidenzia il modo con cui ciascuno dei 3 disturbi influenzi la variabile di uscita

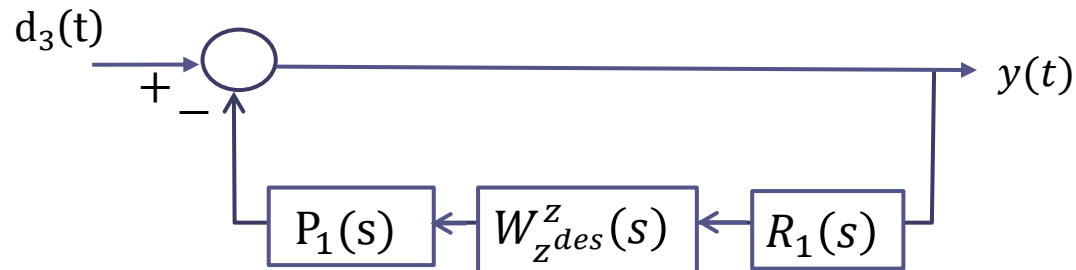
Schema equivalente  $d_1(t)$



Schema equivalente  $d_2(t)$

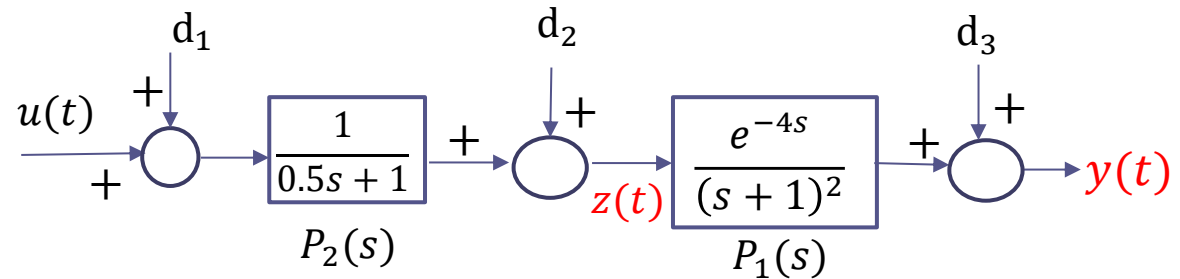


Schema equivalente  $d_3(t)$



## Vediamo un esempio

### Processo a ciclo aperto



Processo complessivo

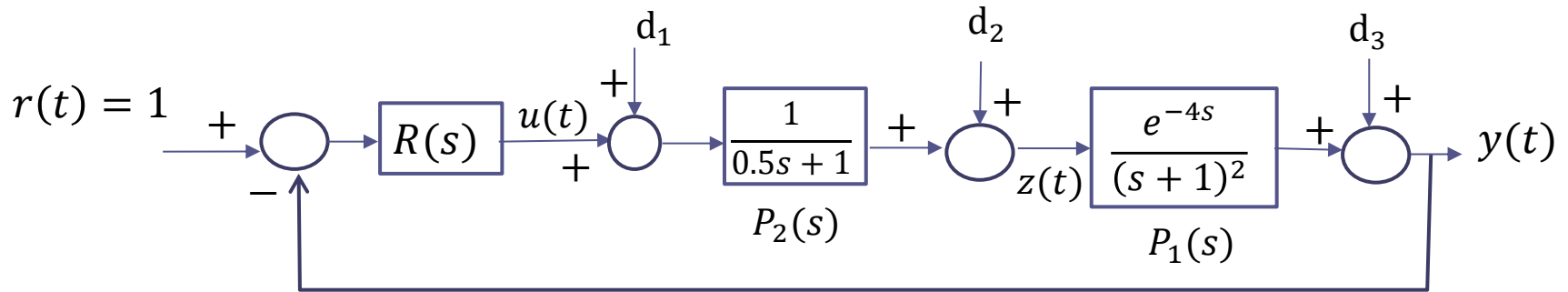
$$P(s) = P_2(s)P_1(s) = \frac{1}{0.5s + 1} \cdot \frac{e^{-4s}}{(s + 1)^2}$$

Il processo ha ingresso manipolabile  $u(t)$ , uscita primaria  $y(t)$ , e vi è la possibilità di misurare e retroazionare la variabile intermedia (uscita secondaria)  $z(t)$

Il processo è inoltre soggetto a tre variabili disturbanti che si inseriscono in punti differenti.

Confrontiamo fra loro le prestazioni di un sistema di controllo ad anello singolo e di un sistema di controllo in cascata.

## Sistema di controllo a loop singolo



$$R(s) = \frac{0.2(s + 1)}{s}$$

Controllore PI

I disturbi a gradino unitario intervengono in istanti di tempo differenti

$$T_{d1} = 150$$

$$T_{d2} = 350$$

$$T_{d3} = 550$$

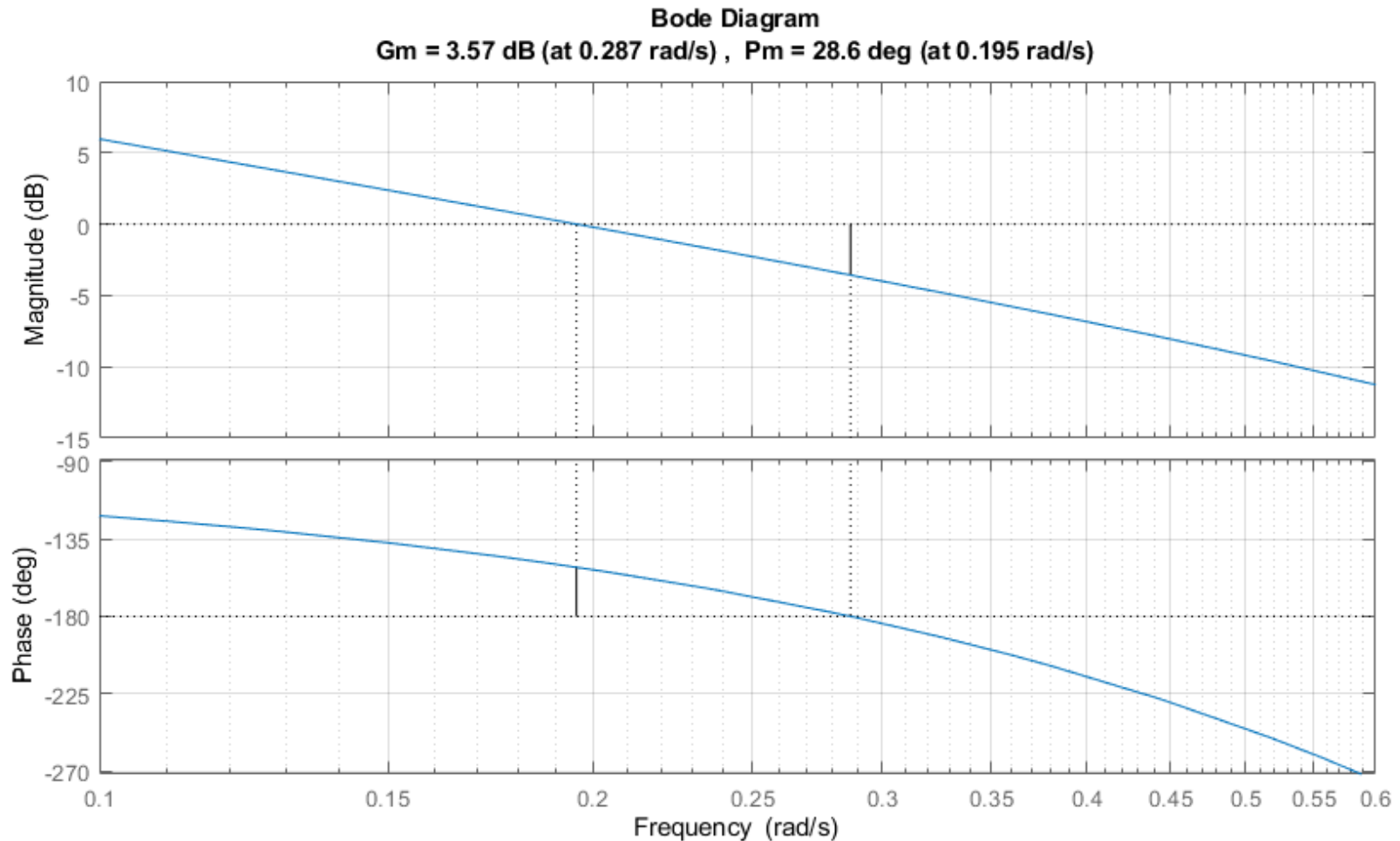
**FILES:**

ContrCascata\_es01.slx

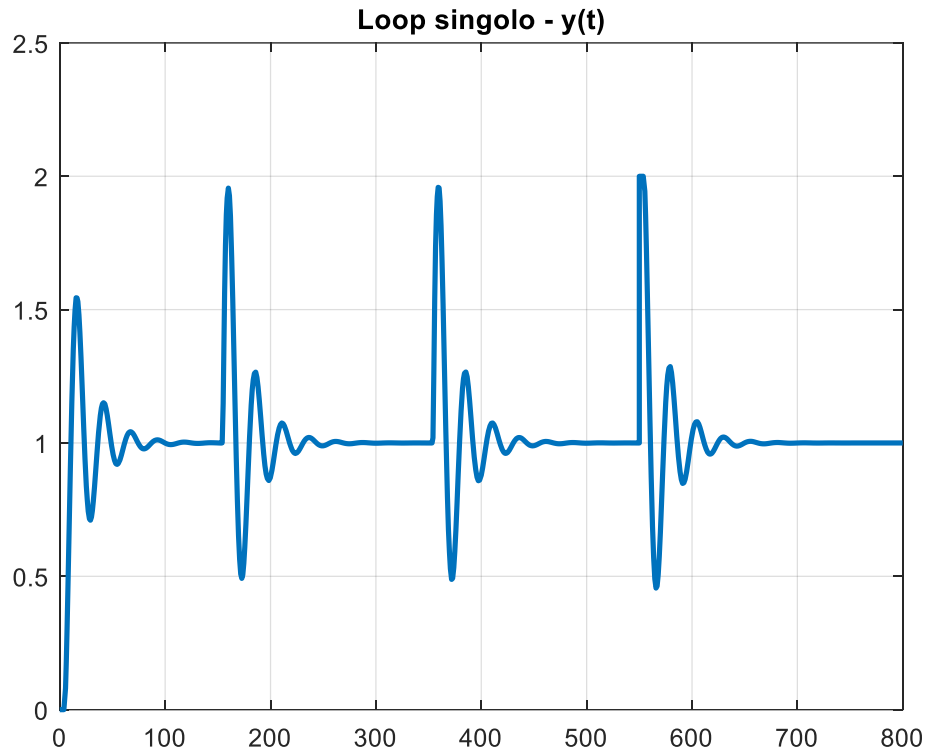
ContrCascata\_es01\_script.m

Diagrammi di Bode della FdT a ciclo aperto  $R(s)P_1(s)P_2(s)$ .

Il criterio di Bode mostra come il sistema di controllo a loop singolo sia asintoticamente stabile a ciclo chiuso.

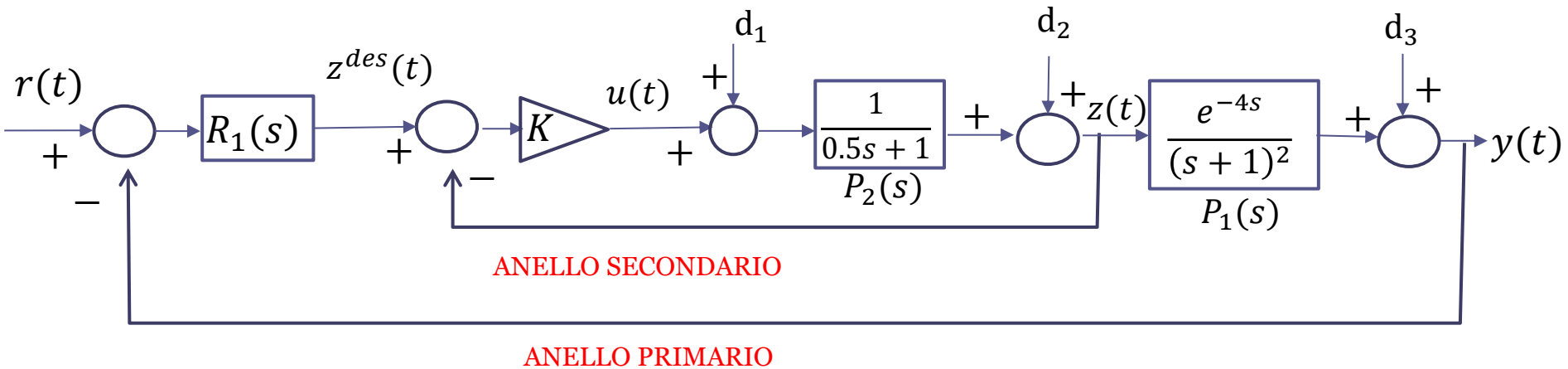


## Evoluzione temporale dell'uscita



Il sistema di controllo di tipo 1 con il polo nell'origine nel regolatore garantisce la precisione statica ed è in grado di operare la reiezione di tutti e tre gli ingressi disturbanti costanti. La relativa dinamica è piuttosto scadente. Ciò è da ascrivere all'elevato valore del ritardo presente nel processo.

## Sistema di controllo in cascata



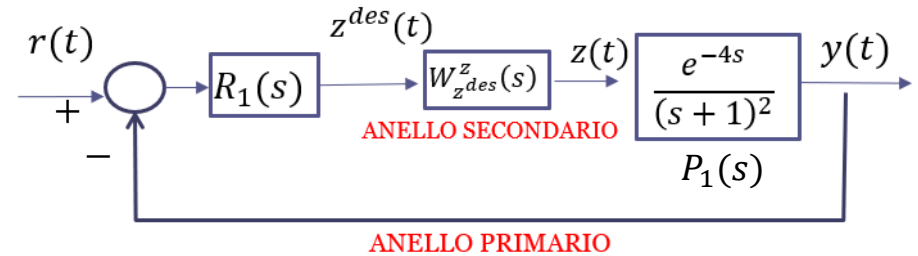
$$R_1(s) = \frac{0.2(s+1)}{s}$$

Utilizziamo come regolatore dell'anello primario lo stesso regolatore  $R(s)$  impiegato nel sistema di controllo ad anello singolo.

$$R_2(s) = K = 100$$

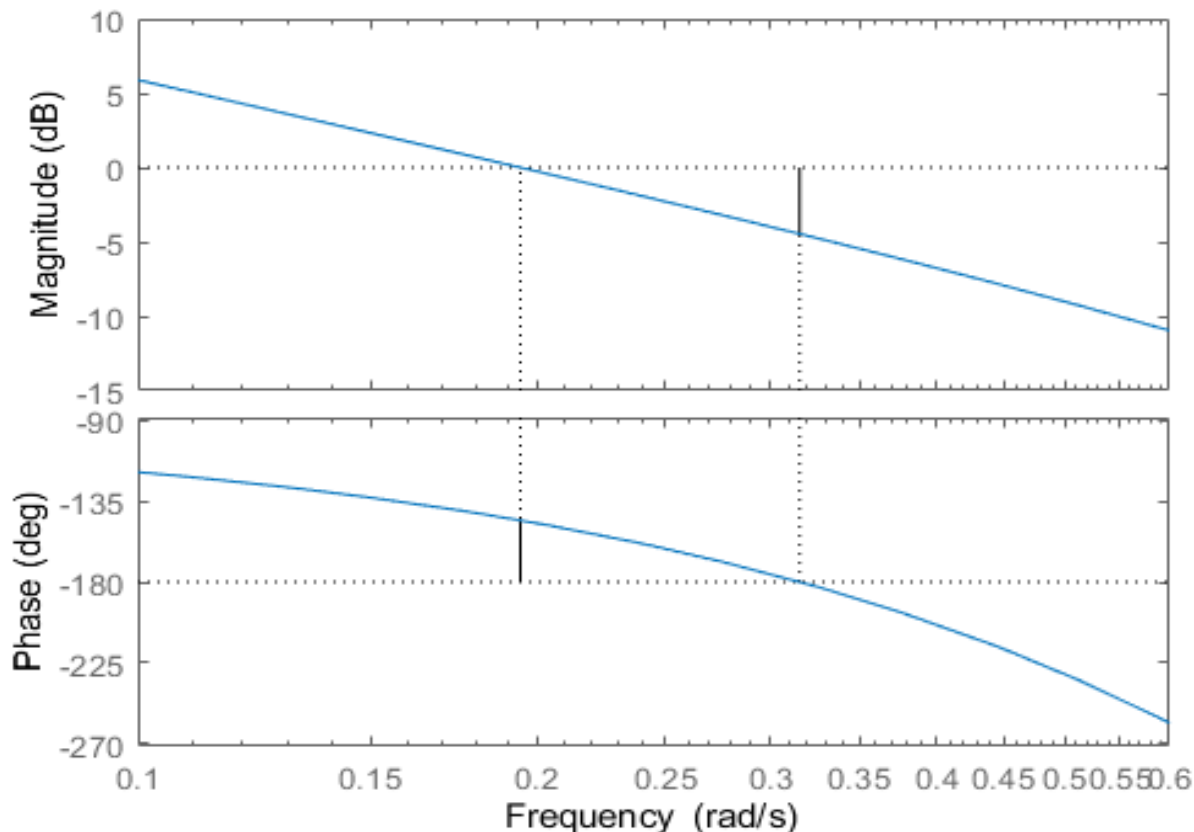
Valutiamo se il sistema di controllo risulti essere asintoticamente stabile a ciclo chiuso e se il criterio di progetto che impone che la banda passante dell'anello secondario debba essere almeno 5 volte più elevata di quella dell'anello primario sia soddisfatto

Diagrammi di Bode della FdT a ciclo aperto  $R_1(s)W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)$ .



**Bode Diagram**

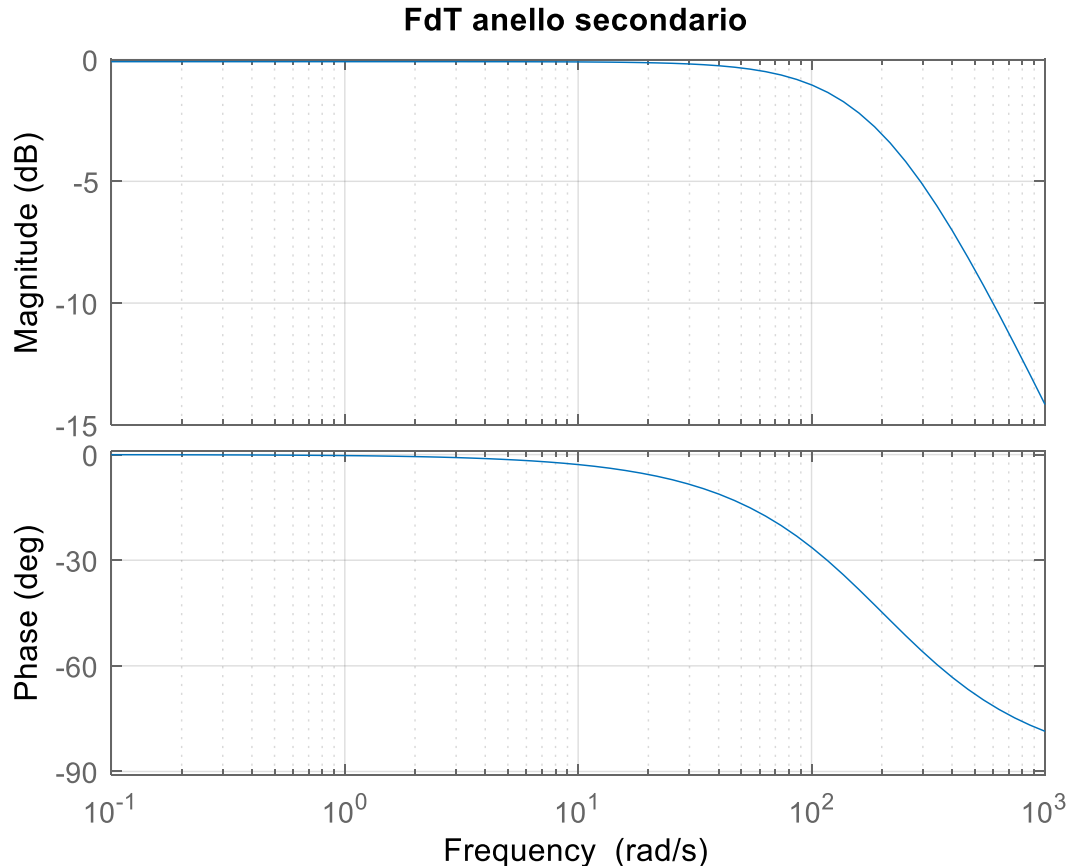
**Gm = 4.46 dB (at 0.316 rad/s) , Pm = 34.4 deg (at 0.194 rad/s)**



Il criterio di Bode mostra come il sistema di controllo in cascata sia asintoticamente stabile a ciclo chiuso.

## Diagrammi di Bode della FdT a ciclo chiuso dell'anello **secondario**

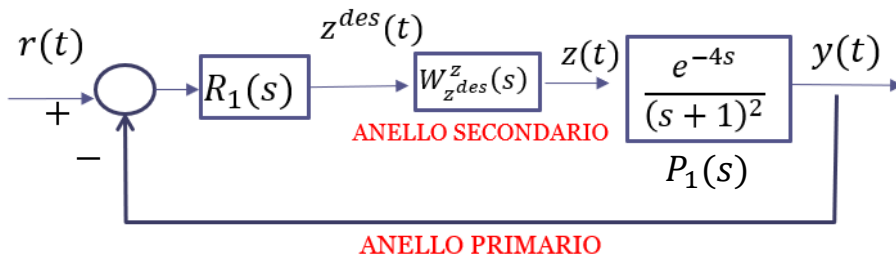
$$W_{z^{des}}(s) = \frac{\frac{K}{0.5s + 1}}{1 + \frac{K}{0.5s + 1}} = \frac{K}{0.5s + 1 + K} = \frac{100}{0.5s + 101} = \frac{\mu_s}{0.005s + 1} \quad \mu_s \cong 0.99$$



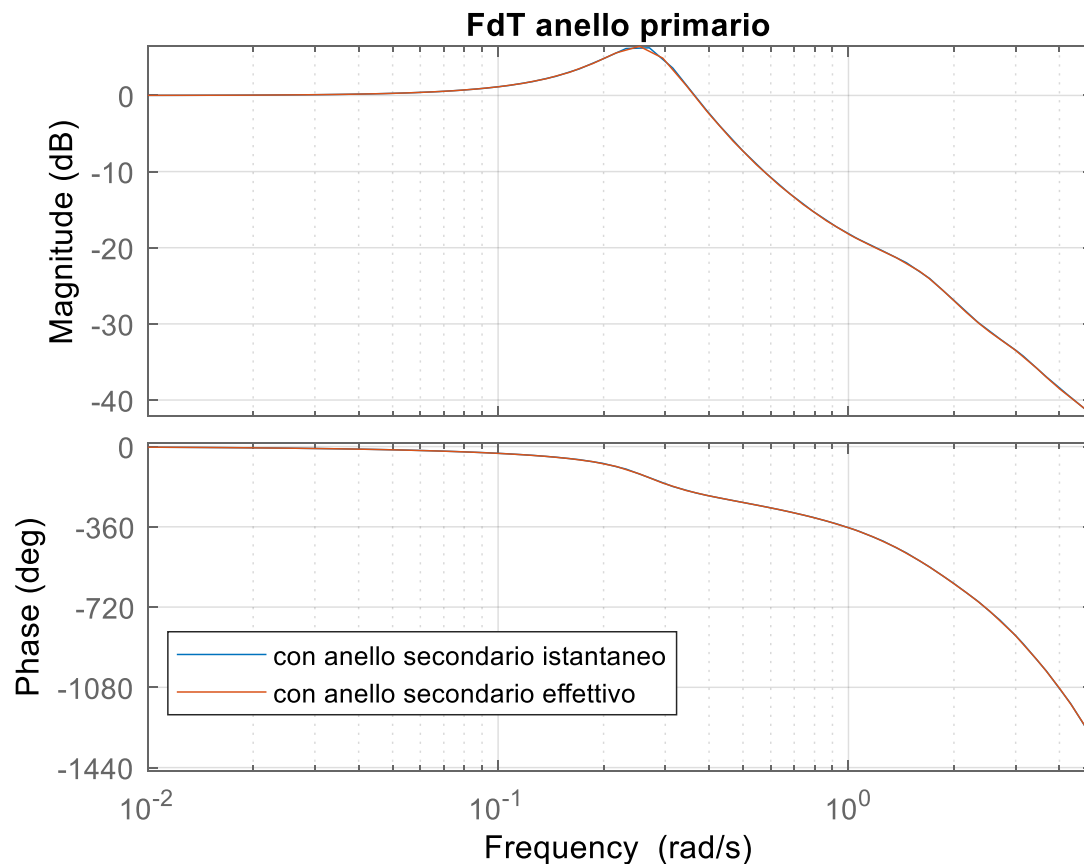
Il polo di  $W_{z^{des}}(s)$  sta in  $-200$

La banda passante dell'anello secondario è pari a 200 rad/s

Il guadagno statico  $\mu_s$  è lievemente minore di 1 in quanto il sistema di controllo dell'anello secondario è di tipo zero.



Diagrammi di Bode della FdT a ciclo chiuso dell'anello **primario**

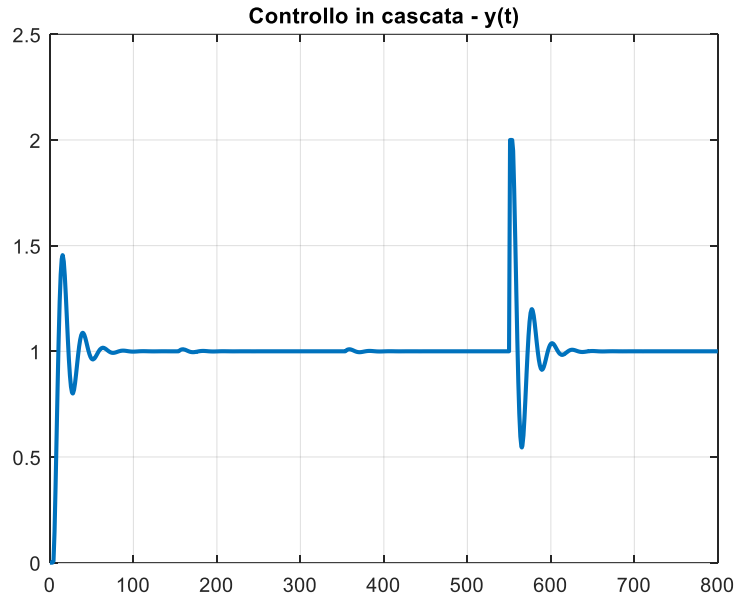


$$W_r^y(s) = \frac{R_1(s)W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)}{1 + R_1(s)W_{z^{des}}^z(s)P_1(s)}$$

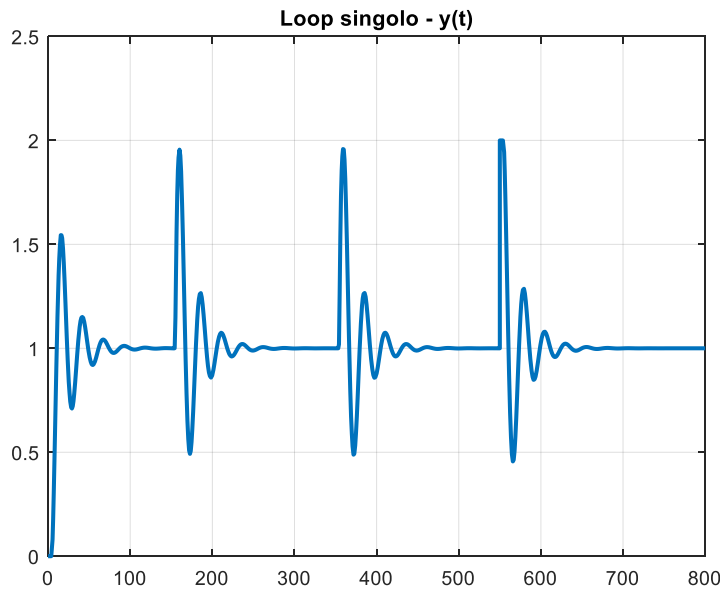
$$W_r^y(s) = \frac{R_1(s)\mu_s P_1(s)}{1 + R_1(s)\mu_s P_1(s)}$$

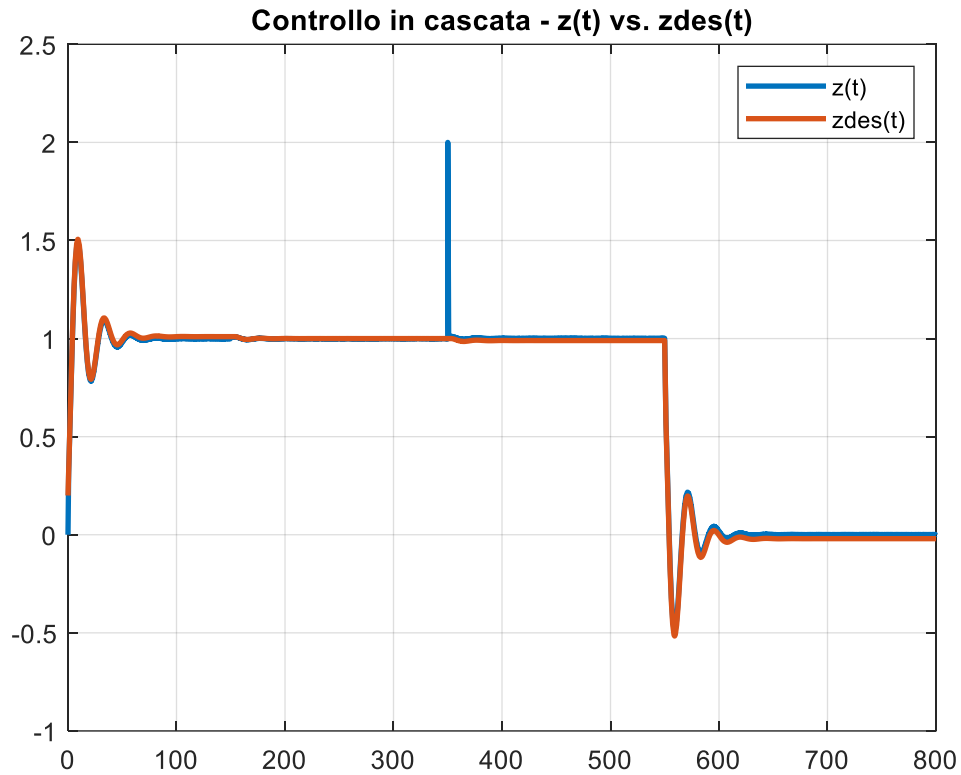
La banda passante dell'anello primario (che contiene una risonanza) è circa pari a 0.4 rad/s

# Evoluzione temporale dell'uscita



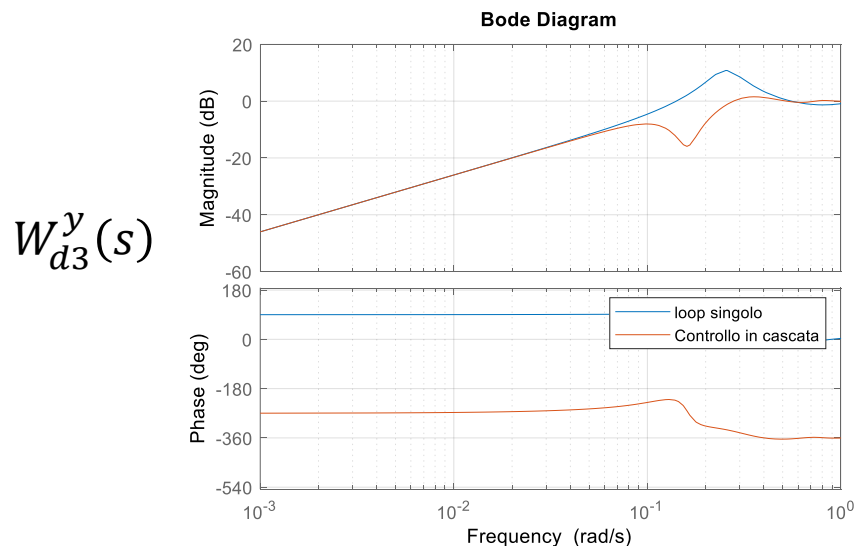
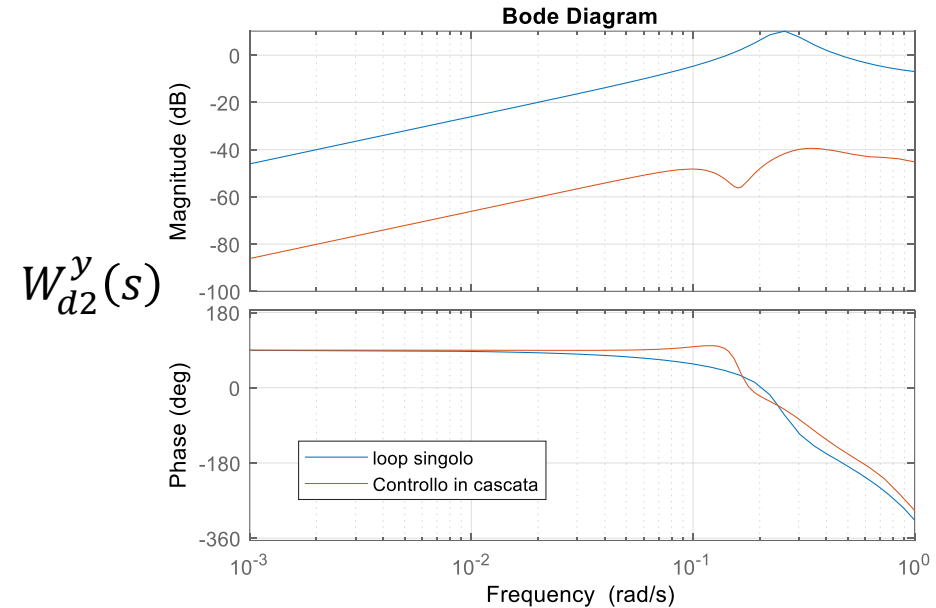
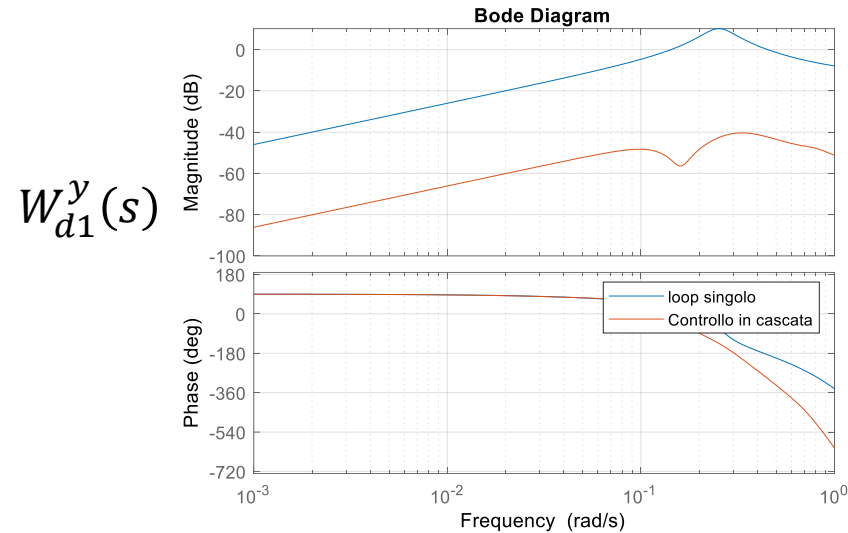
L'architettura in cascata migliora notevolmente le proprietà di reiezione dei disturbi  $d_1$  e  $d_2$  che intervengono nell'anello secondario lasciando pressoché inalterato il legame a ciclo chiuso fra il disturbo  $d_3$  (che interviene nell'anello primario) e l'uscita e fra il set point e l'uscita





Nel sistema di controllo in cascata l'uscita secondaria  $z(t)$  ed il suo set point  $zdes(t)$  sono molto prossime

## FdT a ciclo chiuso fra i **disturbi** e l'**uscita**



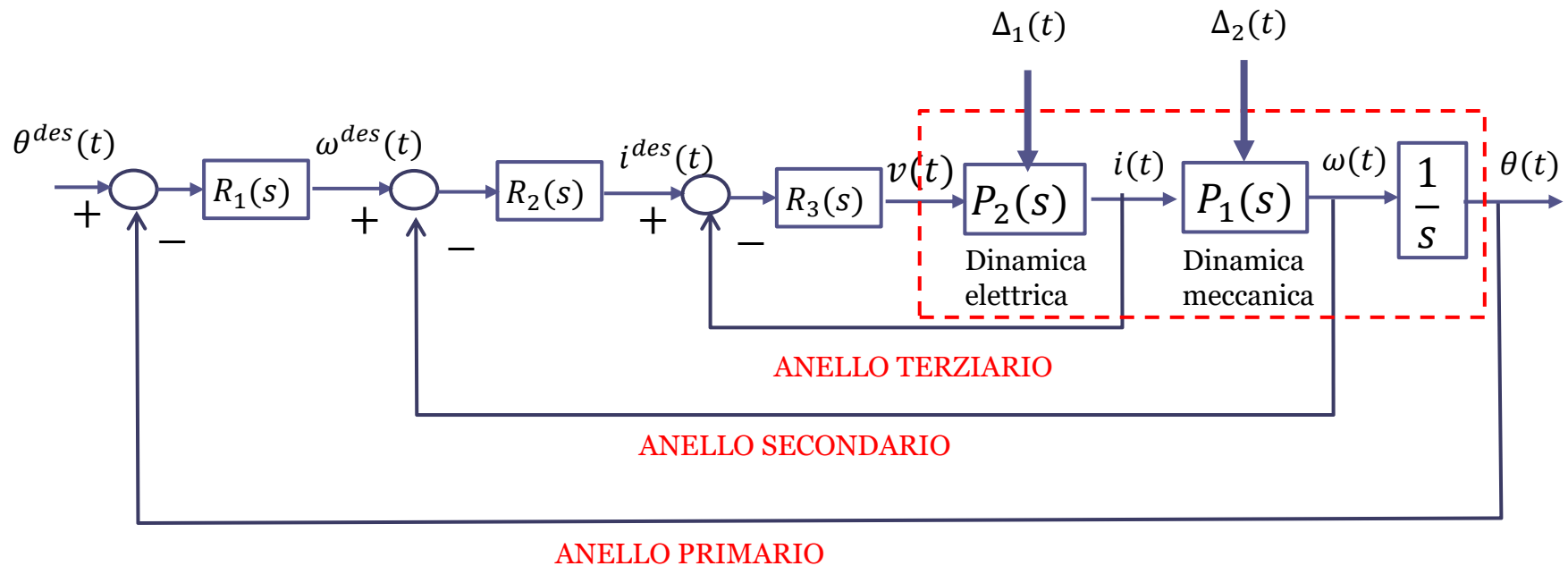
Si noti come le FdT  $W_{d1}^y(s)$  e  $W_{d2}^y(s)$  del sistema di controllo in cascata presentino nella banda dell'anello primario un **significativa attenuazione dei moduli** rispetto alle corrispondenti FdT del sistema di controllo ad anello singolo.

**Si implementano talvolta sistemi di controllo in cascata aventi 3 o più anelli**

**Regolazione della posizione di un servomeccanismo**

**Regolazione di un (convertitore statico che alimenta) un elettrolizzatore PEM**

## Regolazione della posizione di un servomeccanismo



Anello esterno (primario) di posizione

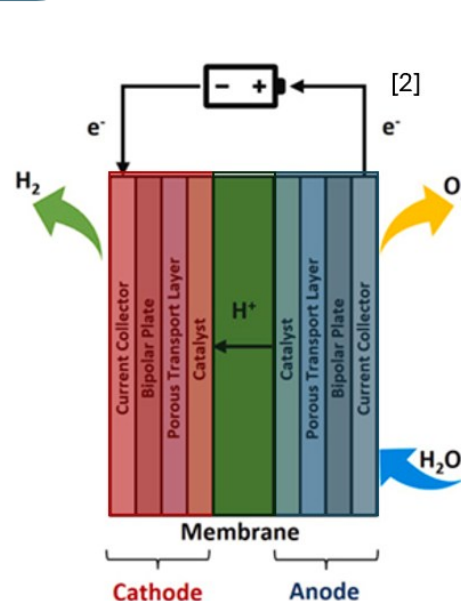
Anello intermedio (secondario) di velocità

Anello interno (terziario) di corrente

# Produzione di idrogeno mediante elettrolizzatori PEM

## Processi di produzione dell'idrogeno

	IDROGENO MARRONE	IDROGENO GRIGIO	IDROGENO BLU	IDROGENO TURCHESE	IDROGENO GIALLO	IDROGENO ROSA	IDROGENO VERDE
<b>Processo</b>	Gassificazione	Steam reforming	Steam reforming o gassificazione con CCS	Pirolisi	Elettrolisi	Elettrolisi	Elettrolisi
<b>Fonte Energetica</b>	Carbone	Gas Metano	Gas metano Carbone	Gas metano	Energia Elettrica dalla rete elettrica	Energia Elettrica Nucleare	Energia Elettrica Rinnovabile



## Elettrolizzatori PEM



# Regolazione di un (convertitore statico che alimenta) un elettrolizzatore PEM



Università degli  
Studi di Cagliari

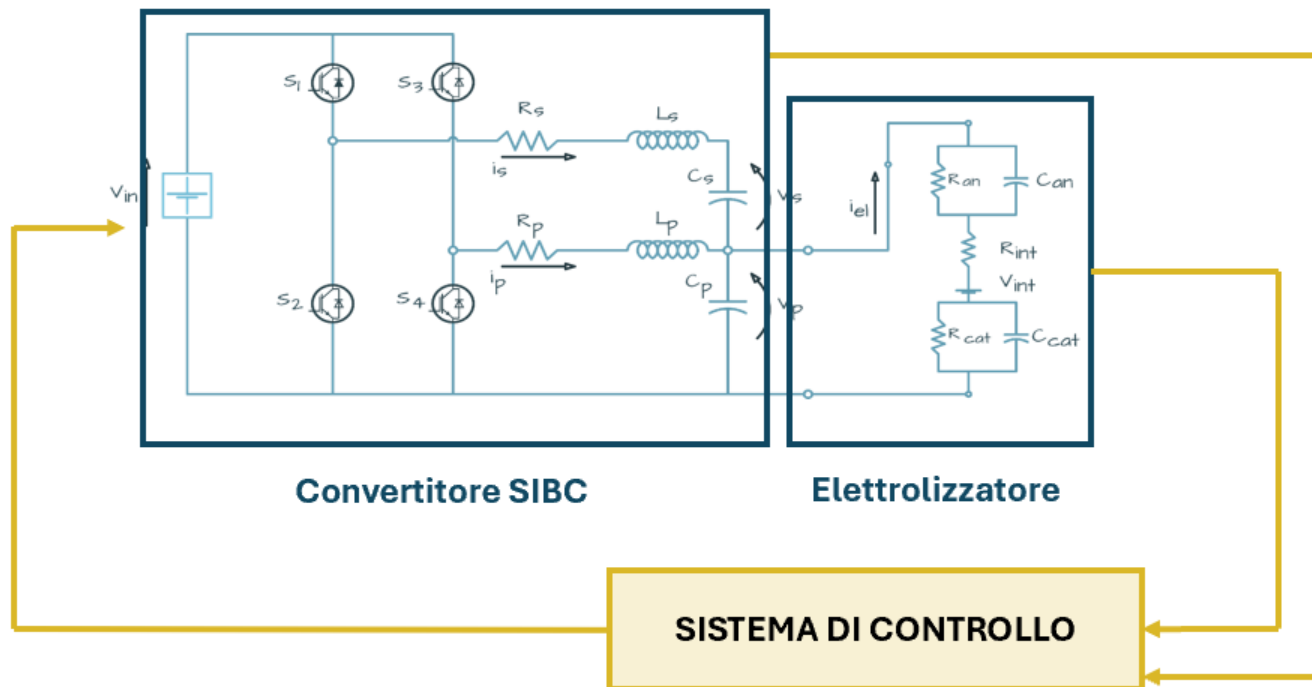
## Sistema di controllo

### Obiettivo della tesi

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Elettrica

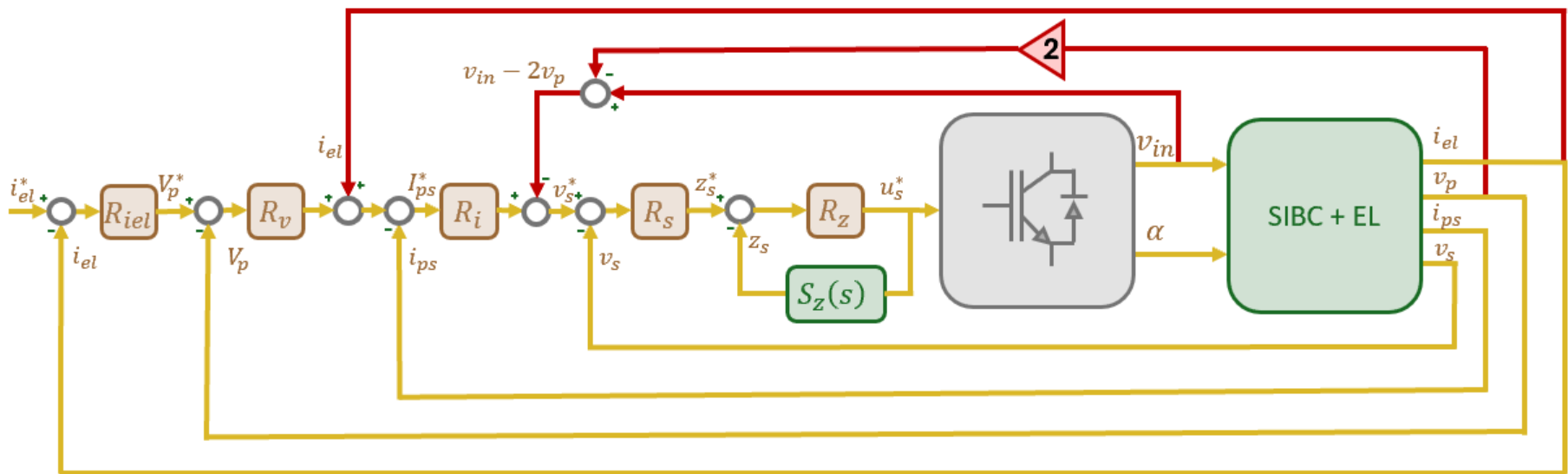


Sistema di controllo dell'alimentazione elettrica di un elettrolizzatore di tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*), che consenta di controllare la tensione/corrente di alimentazione del dispositivo e di effettuare al contempo una gestione energetica, regolando la produzione di idrogeno.





## Schema generale del sistema di controllo



$$f_{SIBC} > \omega_{c_z} > \omega_{c_s} > \omega_{c_i} > \omega_{c_v} > \omega_{c_{i0}}$$

Controllo in cascata con **5 anelli** di corrente o tensione

20 gennaio 2022 Prova finale di Controlli Automatici

**Es 3 – 8 punti**

3.A (4 punti) Con riferimento allo schema di controllo in Figura 3, scegliere il guadagno  $K$  del regolatore dell'anello secondario in modo che il sistema di controllo soddisfi i requisiti di progetto di un sistema di controllo in cascata.

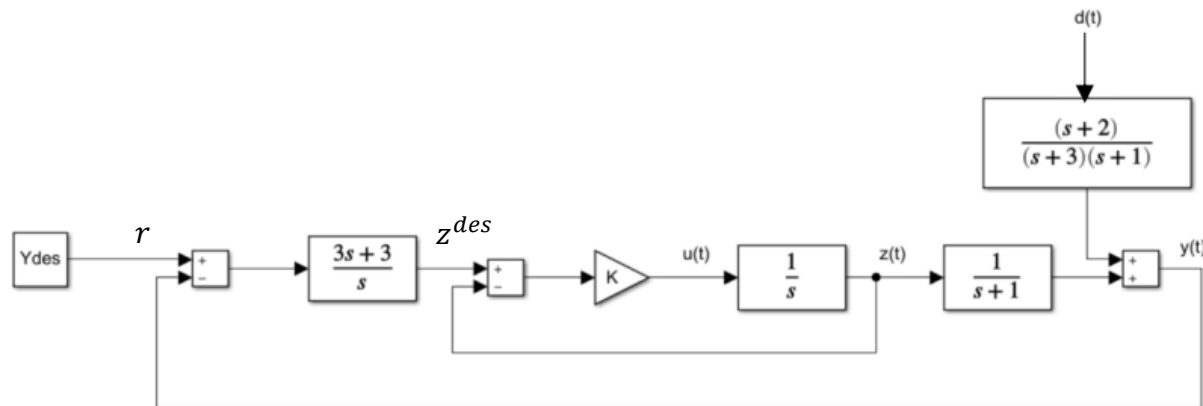


Fig. 3 Sistema di controllo in cascata relativo ai quesiti 3.A e 3.B

## Traccia soluzione

*FdT a ciclo chiuso dell'anello secondario*

$$W_{z^{des}}^z(s) = \frac{\frac{K}{s}}{1 + \frac{K}{s}} = \frac{K}{s + K} = \frac{1}{T_s s + 1} \quad T_s = \frac{1}{K}$$

$W_{z^{des}}^z(s)$  è di tipo STC. La sua banda passante è il reciproco della costante di tempo  $T_s$

$$\Rightarrow \omega_{b1} = \frac{1}{T_s} = K \text{ rad/s}$$

*FdT a ciclo chiuso dell'anello primario*

La deduciamo **approssimando l'anello secondario con un blocco istantaneo** ( $W_{z^{des}}^z(s) = 1$ ), cioè assumendo  $z(t) = z^{des}(t)$

$$W_r^y(s) = \frac{\frac{3s + 3}{s} \cdot W_{z^{des}}^z(s) \cdot \frac{1}{s + 1}}{1 + \frac{3s + 3}{s} \cdot W_{z^{des}}^z(s) \cdot \frac{1}{s + 1}} \approx \frac{\frac{3(s + 1)}{s} \cdot \frac{1}{s + 1}}{1 + \frac{3(s + 1)}{s} \cdot \frac{1}{s + 1}} = \frac{\frac{3}{s}}{1 + \frac{3}{s}} = \frac{1}{\frac{1}{3}s + 1}$$

Anche  $W_r^y$  è di tipo STC. La sua banda passante è il reciproco della costante di tempo:

$$\Rightarrow \omega_{b2} = 3 \text{ rad/s}$$

Imponiamo che la banda passante dell'anello secondario sia maggiore o uguale a cinque volte la banda passante dell'anello primario:

$$\omega_{b1} \geq 5\omega_{b2} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{K \geq 15}$$

## Riepilogo

Il controllo in cascata risulta particolarmente utile quando il processo ha caratteristiche tali da rendere problematico il progetto di un sistema di controllo a loop singolo ad elevate prestazioni, caratteristiche quali:

Grado relativo elevato

Poli o zeri nel semipiano destro

Ritardi elevati rispetto alle costanti di tempo del sistema

Disturbi multipli che agiscono in diversi punti del processo

Il controllo in cascata risulta particolarmente performante rispetto allo schema tradizionale ad anello singolo quando la variabile secondaria può essere scelta in modo tale che i disturbi maggiormente rilevanti e le principali non linearità agiscano sull'anello secondario

La regolazione in cascata è una funzionalità standard dei regolatori commerciali.

## Applicazioni tipiche dei sistemi di controllo in cascata nelle regolazioni industriali

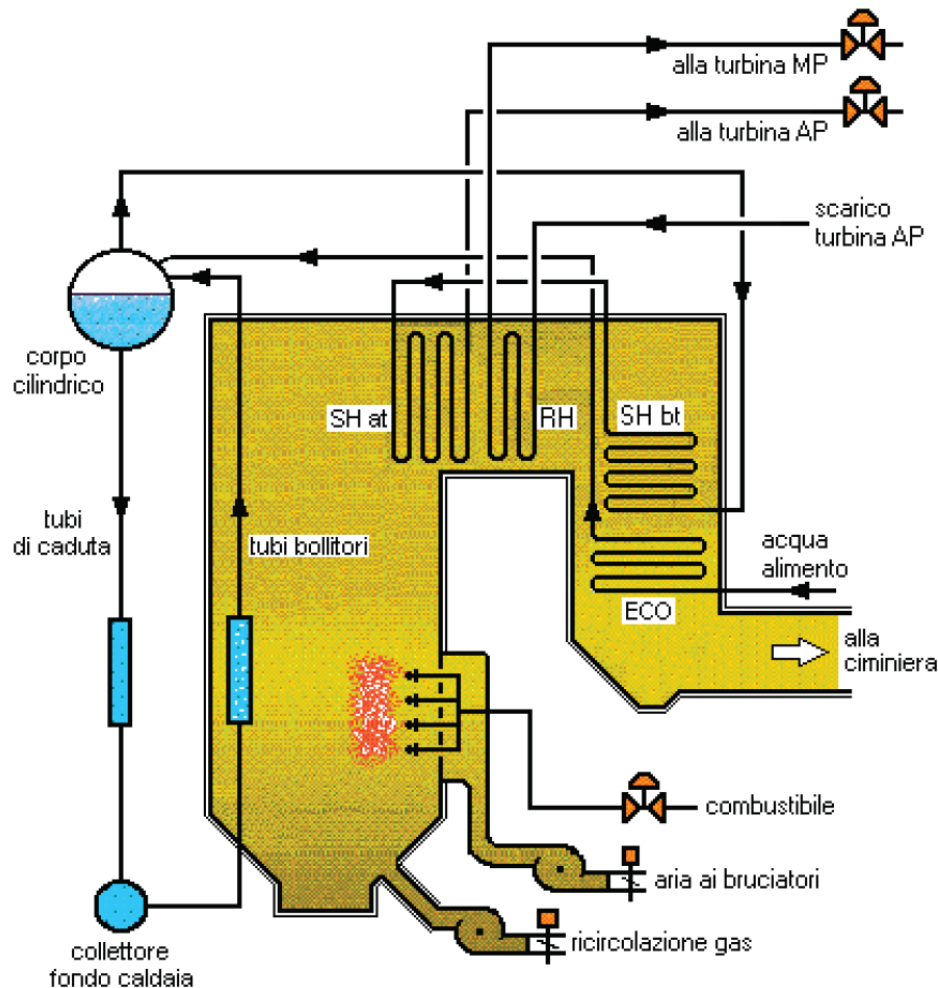
### *Anello secondario di portata - esempi*

La portata di un fluido è la variabile che agisce direttamente sul livello di un serbatoio, sulla concentrazione di un prodotto chimico, sulla temperatura di uscita di uno scambiatore di calore o di un impianto solare termodinamico (il problema della regolazione di quest'ultima tipologia di processi sarà approfondito nel seguito) ed in molti altri ambiti ancora.

Essa però non è mai una variabile direttamente manipolabile, essendo modulata con l'ausilio di servovalvole e/o pompe/compressori.

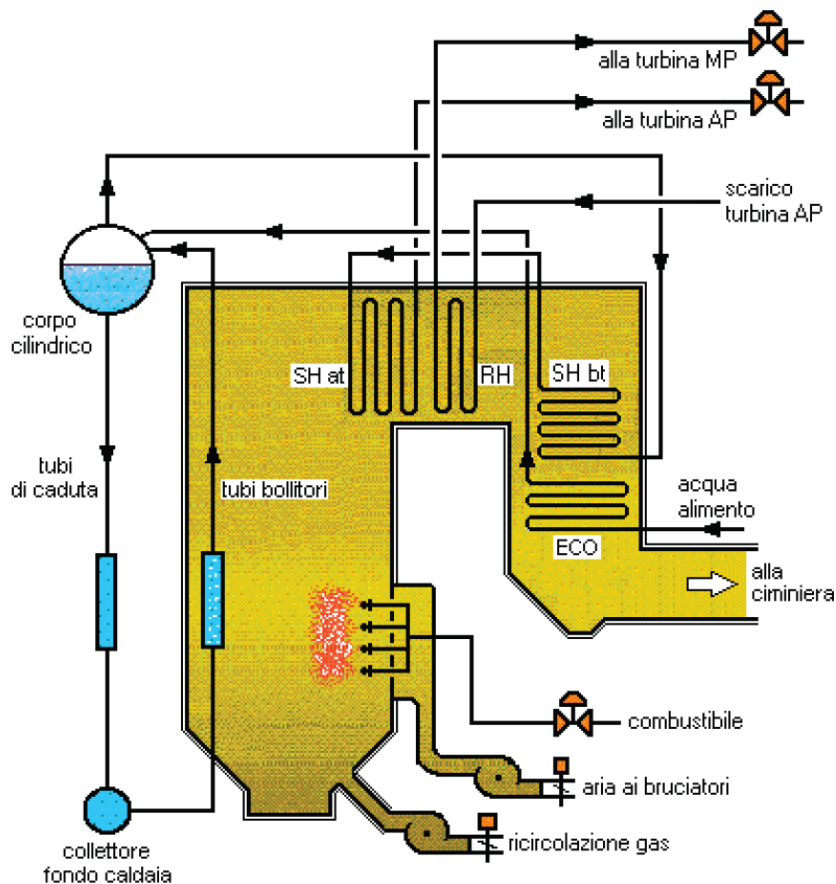
E' molto frequente pertanto la realizzazione di regolazioni di livello, concentrazione, pressione, temperatura impiegando sistemi di controllo in cascata **con anello secondario di portata**, che può essere realizzato ad elevata banda passante.

Nel controllo di **caldaie** (generatori di vapore) di medie e grandi dimensioni ci sono diverse regolazioni che vengono implementate mediante controllo in cascata con anello secondario di portata



Un generatore di vapore si può descrivere come una sorta di grande scatola metallica divisa in due zone: **radiante** e **convettiva**, collegate a due serbatoi (corpo cilindrico e collettore fondo caldaia). La zona radiante è quella in cui viene trasferito calore per irraggiamento e viene anche definita **camera di combustione**.

La zona convettiva è composta da diversi banchi di tubi separati tra di loro e con dimensioni e funzioni diverse che ricevono calore **per conduzione**.

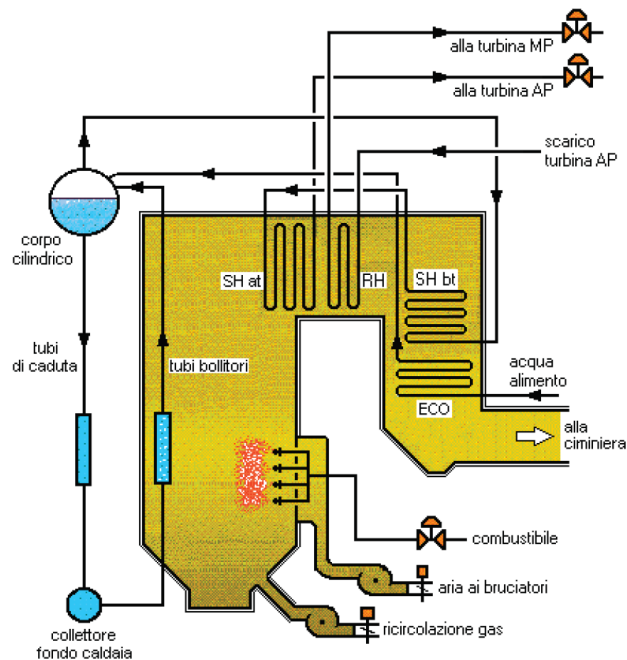


All'interno della camera di combustione, il combustibile e l'aria comburente si mescolano in maniera proporzionata in maniera tale da bruciare e produrre calore. Solitamente questo compito è svolto da **bruciatori** per il combustibile e da ventilatori elettrici per l'aria.

Per quanto riguarda i banchi di tubi, solitamente sono i seguenti: **tubi bollitori**, **economizzatore (ECO)**, **surriscaldatori (SH)** che sono almeno due e riscaldatori (**RH**). L'economizzatore ECO ha il compito di preriscaldare l'acqua di alimento prima della sua immissione nel corpo cilindrico.

Il corpo caldaia come descritto sopra è collegato ad un serbatoio collettore inferiore che ha lo scopo di raccogliere l'acqua non evaporata, e ad uno superiore che ha la funzione di separare l'acqua dal vapore saturo. Quest'ultimo viene mandato al surriscaldatore **per ottenere vapore surriscaldato** alla temperatura adeguata per l'immissione in turbina.

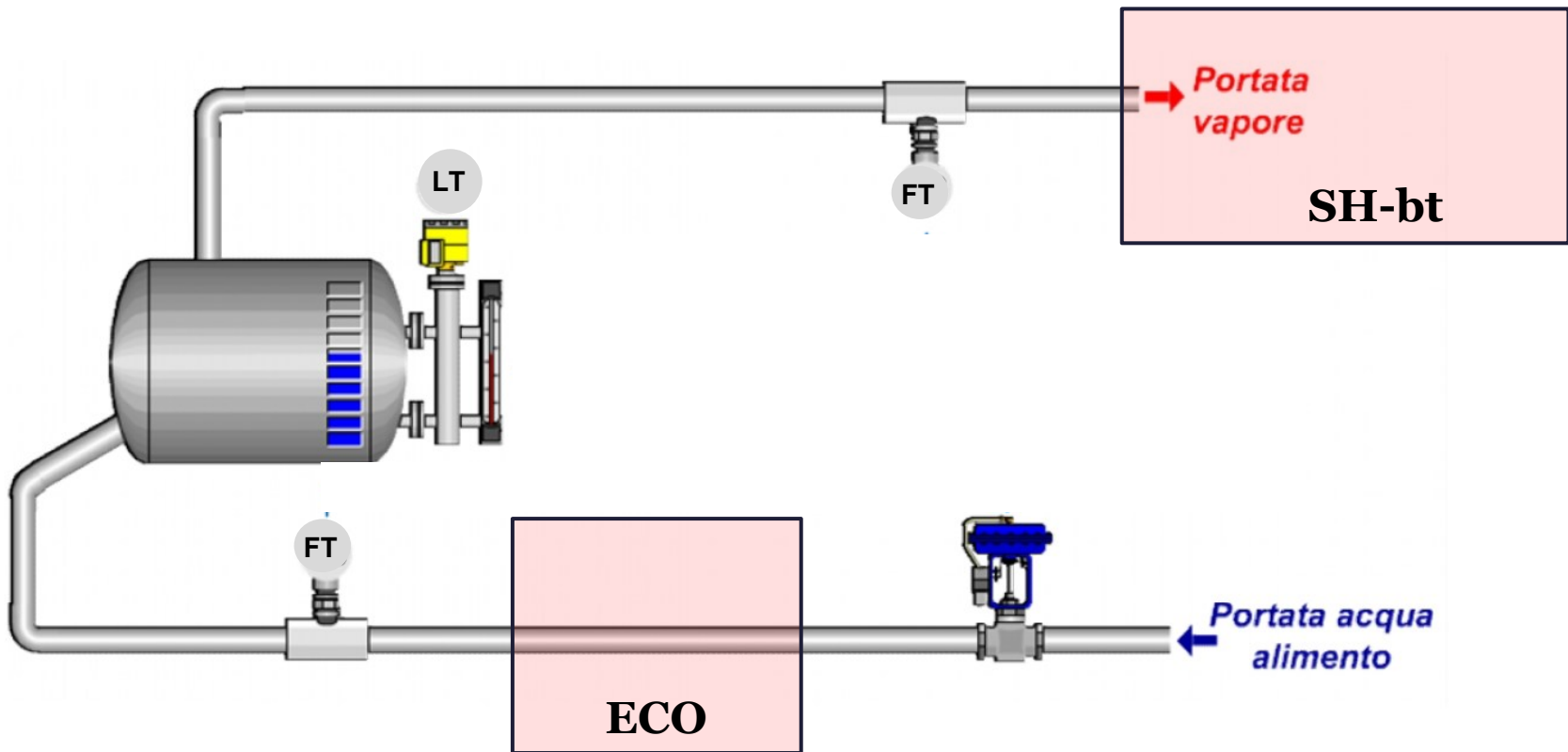
Il processo per generare vapore è molto semplice. **L'acqua viene fatta circolare** all'interno delle tubazioni (tubi di caduta e tubi bollitori) e riscaldata grazie all'utilizzo dei bruciatori fino al raggiungimento delle condizioni di temperatura e pressione necessarie per creare vapore. Bisogna distinguere il circuito in diverse parti:



**1. Circuito acqua-vapore:** l'acqua di alimento spinta all'interno delle tubazioni solitamente utilizzando delle pompe centrifughe, transita nel banco ECO (economizzatore) dove viene preriscaldata utilizzando il calore presente nei fumi della combustione prima di essere rimandata al corpo cilindrico. Il corpo cilindrico separa acqua e vapore saturo e manda quest'ultimo ai banchi SHbt e SHAt in modo da creare vapore surriscaldato alla temperatura voluta che **viene quindi veicolato all'utenza finale (in figura delle turbine).**

**2. Circuito combustibile e circuito aria-fumi:** il combustibile (carbone, gas metano ma anche gas di sintesi o biogas) viene modulato in portata e miscelato ad una adeguata portata di aria comburente affinché possa essere combusto in maniera corretta e con la massima efficienza. L'aria comburente necessaria alla combustione (generata solitamente da un ventilatore elettrico) viene inviata tramite l'utilizzo di condotti metallici alla camera di combustione. I fumi caldi di combustione vengono espulsi tramite tiraggio da parte del camino dopo essere trattati chimicamente **per ridurre le emissioni**

## Regolazione del **livello** nel corpo cilindrico



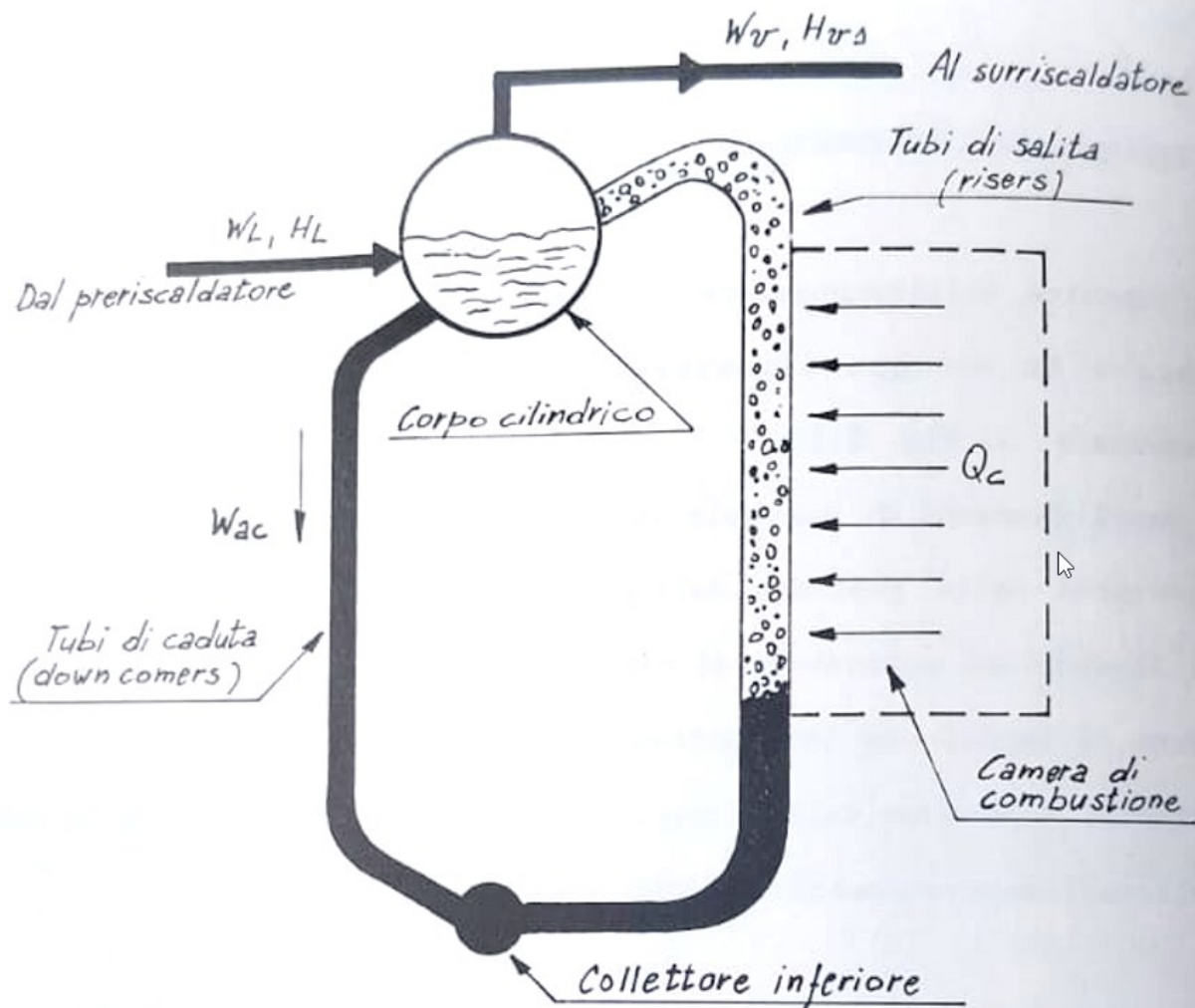
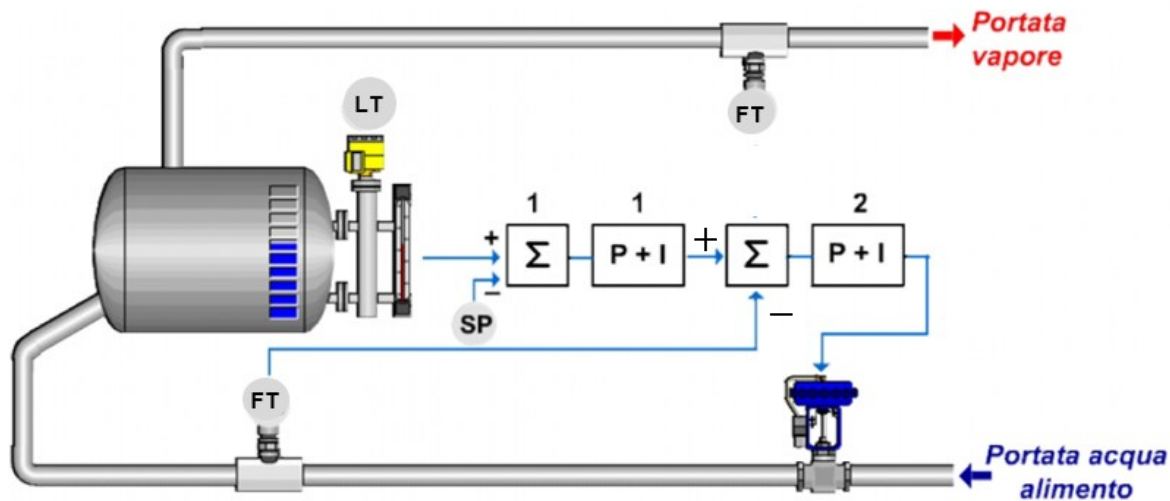


Fig. 3.1 Anello di circolazione naturale.

da «Dinamica dei generatori di vapore», C. Maffezzoni, 1988.



Tale regolazione si implementa mediante un **sistema di controllo in cascata** con **anello primario di livello** ed **anello secondario di portata dell'acqua di alimento**.

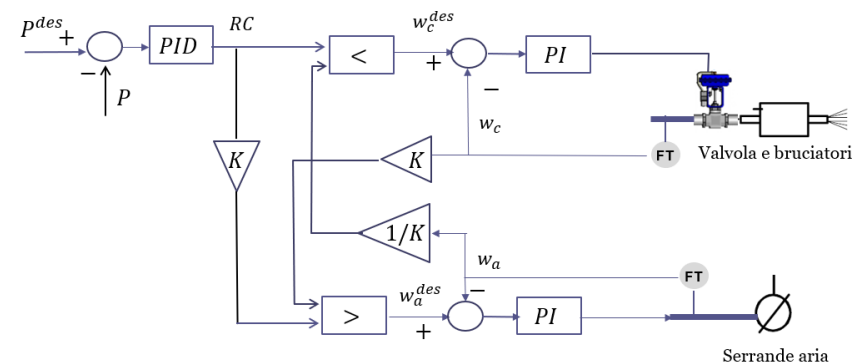
In realtà la regolazione si implementa in maniera ancora più sofisticata, mediante uno schema che viene detto «**regolazione a tre elementi**» in cui viene retroazionata anche la portata del vapore. Tale schema prevede l'impiego congiunto del controllo in cascata e di una ulteriore architettura che vedremo più avanti denominata «**compensazione dei disturbi misurabili**». Quando sarà stata introdotta tale architettura vedremo in maggiore dettaglio la regolazione a tre elementi del livello nel corpo cilindrico di una caldaia.

## - Regolazione di **pressione** nel corpo cilindrico

Tale regolazione si inquadra all'interno di una complessa architettura di **controllo della combustione** finalizzata al mantenimento di un corretto rapporto aria/combustibile. Tale regolazione avviene modulando congiuntamente la portata del combustibile e la portata dell'aria (quest'ultima viene variata agendo sulle serrande aria del ventilatore premente posto all'inizio del circuito aria fumi)

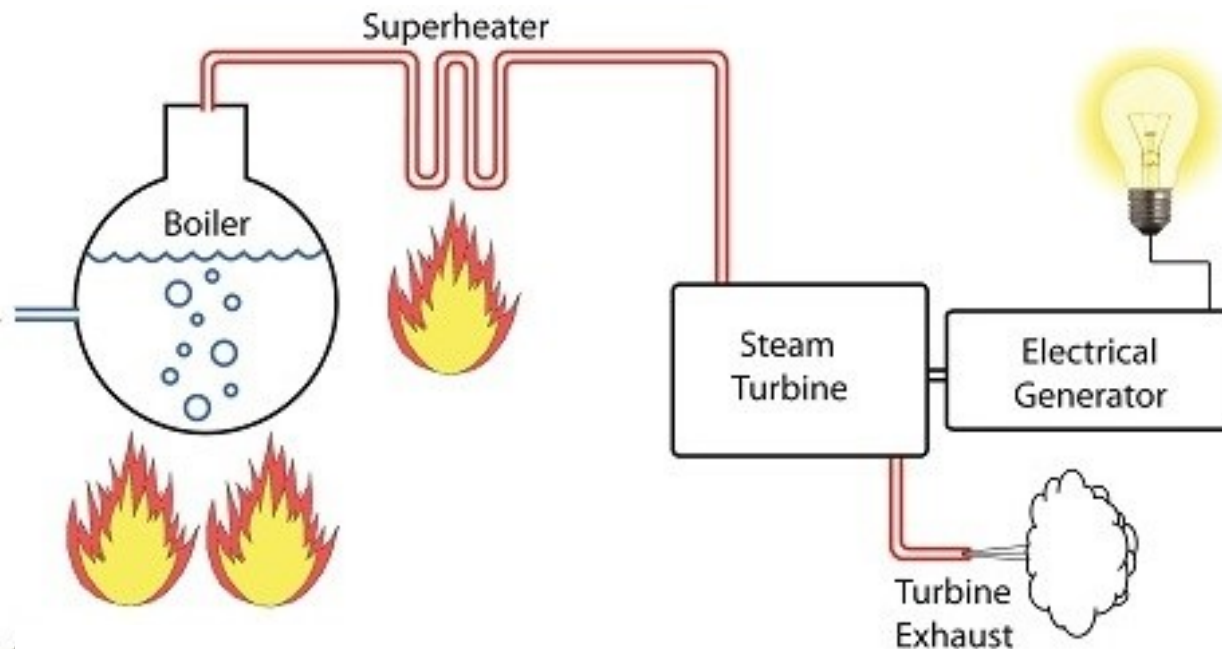
Il relativo sistema di controllo prevede un anello primario di pressione e **due anelli secondari di portata**, uno sulla portata del combustibile ed uno sulla portata dell'aria.

Tali anelli secondari risultano essere fra loro **accoppiati** secondo uno schema complessivo che prevede l'impiego di due architetture avanzate che non abbiamo ancora introdotto: il **controllo di rapporto** (ratio control) ed il **controllo con selettore** (override control). Vedremo in maggiore dettaglio tale schema di controllo un pò più avanti, a valle della descrizione delle architetture «ratio control» ed «override control».

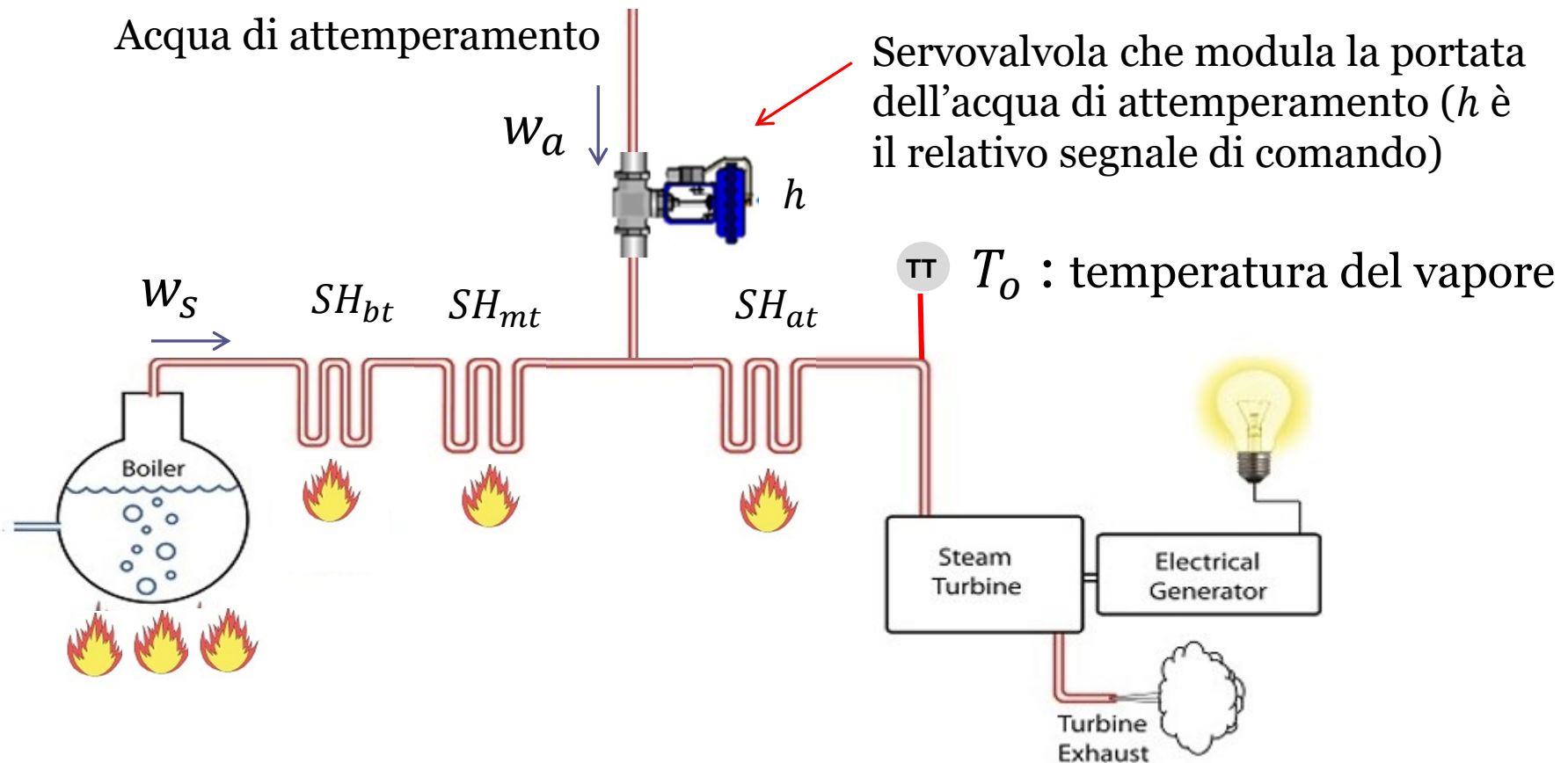


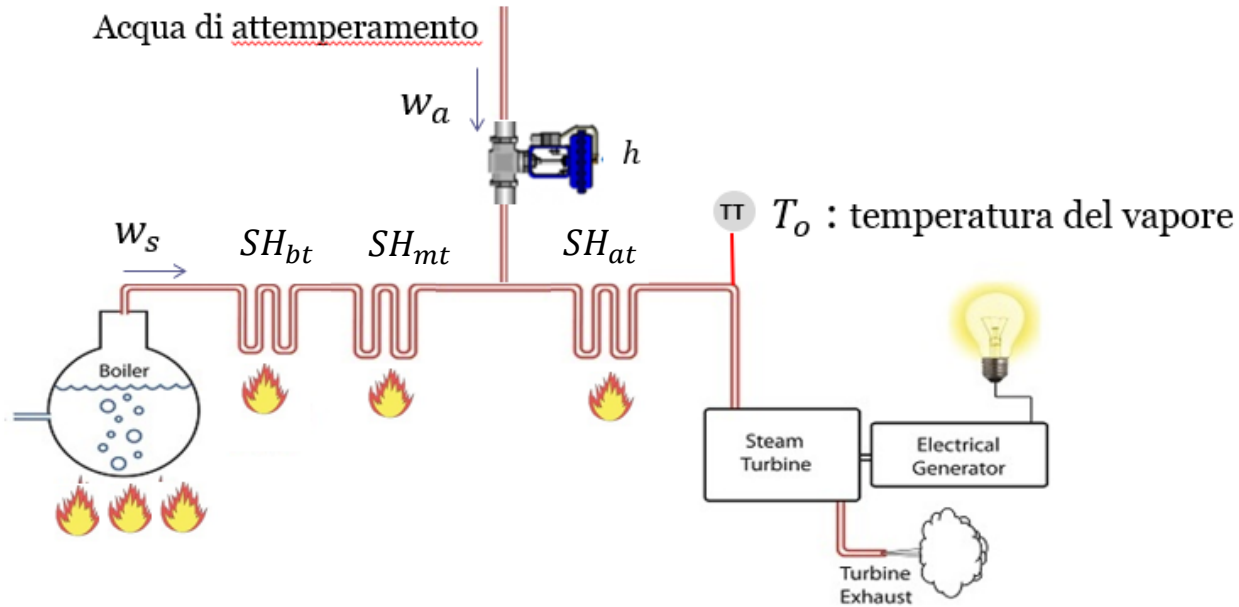
## - Regolazione di **temperatura** del vapore surriscaldato

Il vapore estratto dal corpo cilindrico della caldaia viene successivamente fatto transitare attraverso uno scambiatore di calore a più stadi (surriscaldatore, superheater) mediante il quale sfruttando la potenza termica residua presente nei fumi di scarico viene surriscaldato fino al valore di temperatura prevista per l'immissione del vapore in turbina.



La regolazione fine della temperatura del vapore surriscaldato si effettua iniettando nella corrente del vapore una portata di acqua, detta **acqua di attemperamento** che vaporizzando a contatto del vapore lo «attempera» cioè ne riduce la temperatura. Portate anche molto ridotte di acqua di attemperamento sono sufficienti a ridurre la temperatura del vapore di alcune decine di gradi. Variando quindi la portata  $w_a$  si riesce ad operare una efficace regolazione della temperatura  $T_o$  del vapore all'uscita del terzo stadio surriscaldatore.



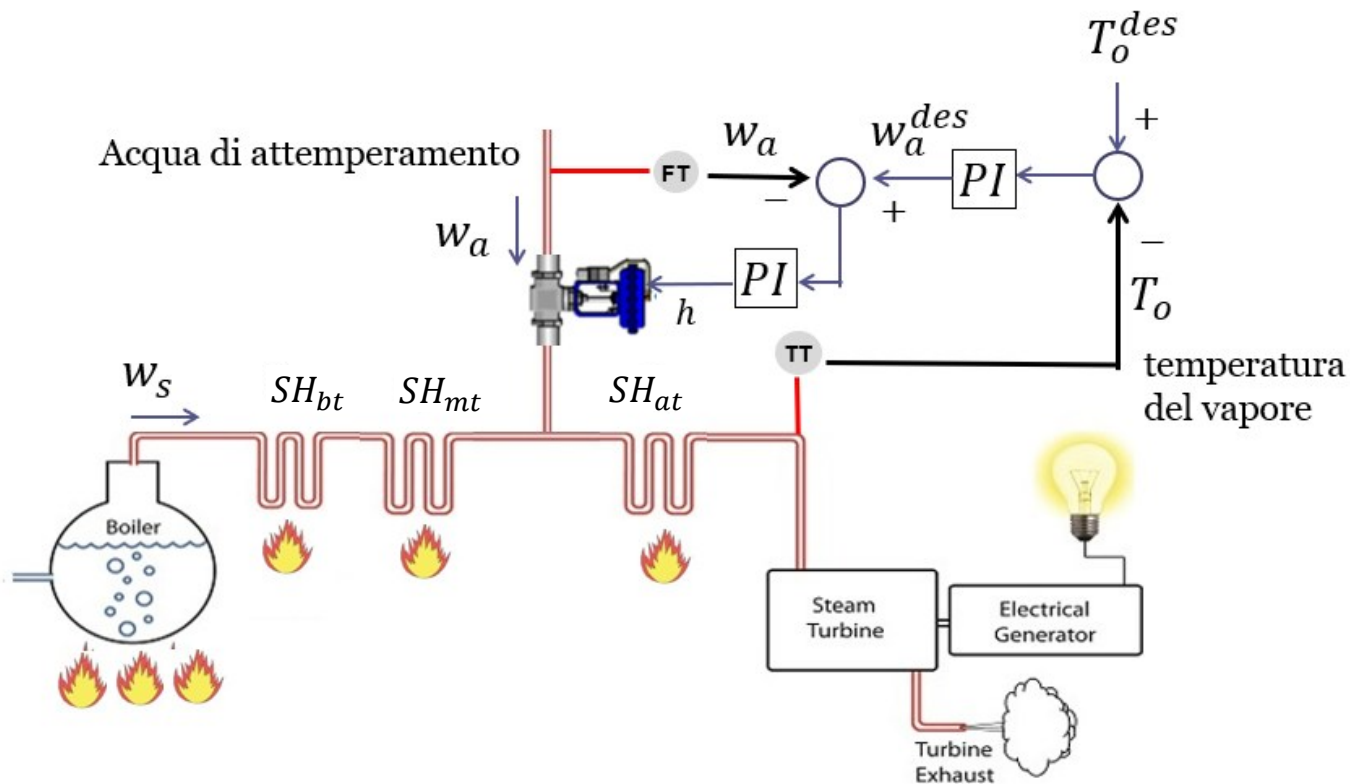


L'acqua di attemperamento non può essere iniettata nella corrente del vapore all'ingresso della turbina. Essa deve essere miscelata alla corrente del vapore all'ingresso dell'ultimo stadio di surriscaldamento  $SH_{at}$  affinché sia garantita la sua completa evaporazione prima dell'immissione in turbina. La presenza di gocce ne danneggerebbe infatti rapidamente la palettatura.

Per effetto di ciò, il legame fra il segnale di comando  $h$  della valvola e la temperatura  $T_o$  del vapore all'ingresso della turbina presenta dinamiche significative, un elevato ritardo, ed una forte variabilità dei parametri in dipendenza del punto di lavoro (il valore della portata del vapore influenza in modo significativo sia il guadagno che il valore del ritardo)

La regolazione della temperatura  $T_o$  mediante un sistema di controllo a loop singolo non è pertanto in grado di garantire una efficace reiezione dei disturbi e delle non linearità

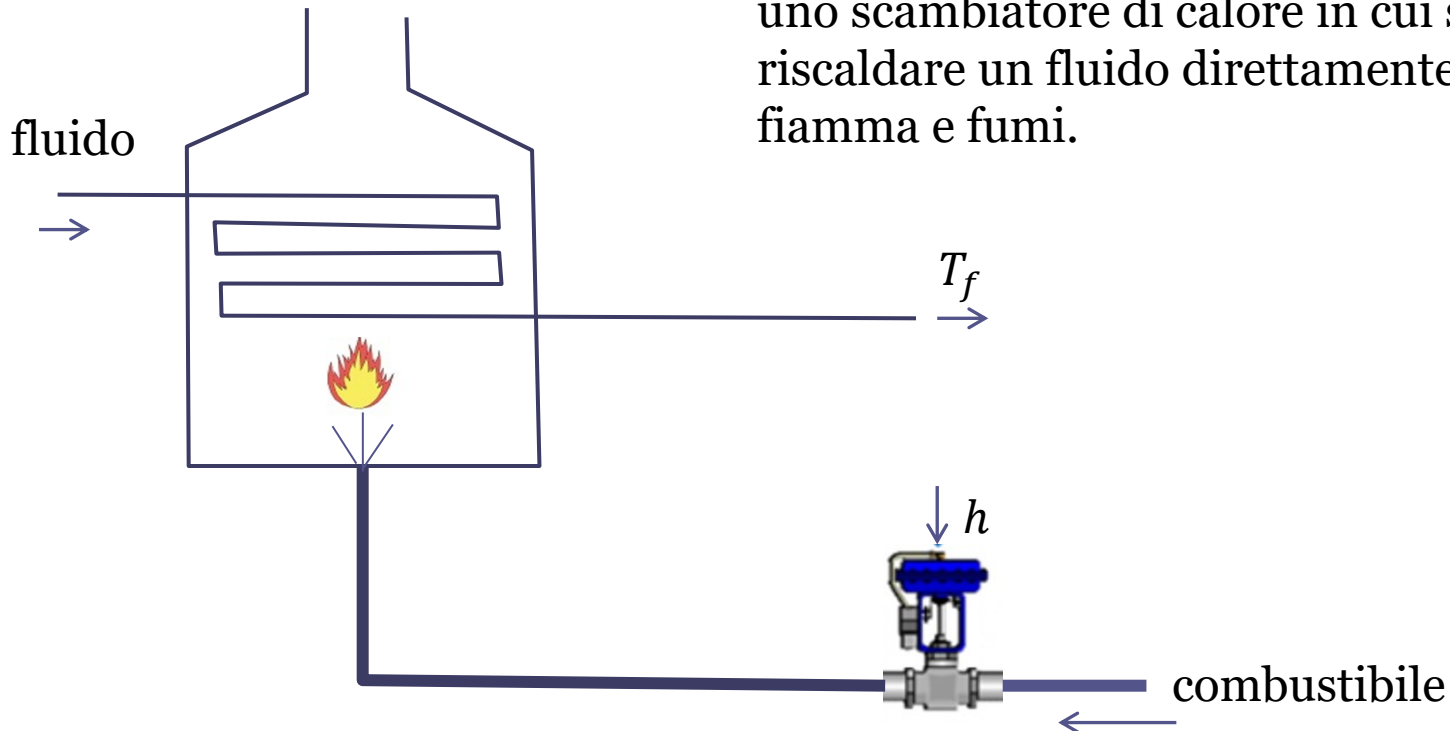
Si fa uso di un sistema di controllo in cascata con anello primario di temperatura ed anello secondario di portata di acqua di attemperamento



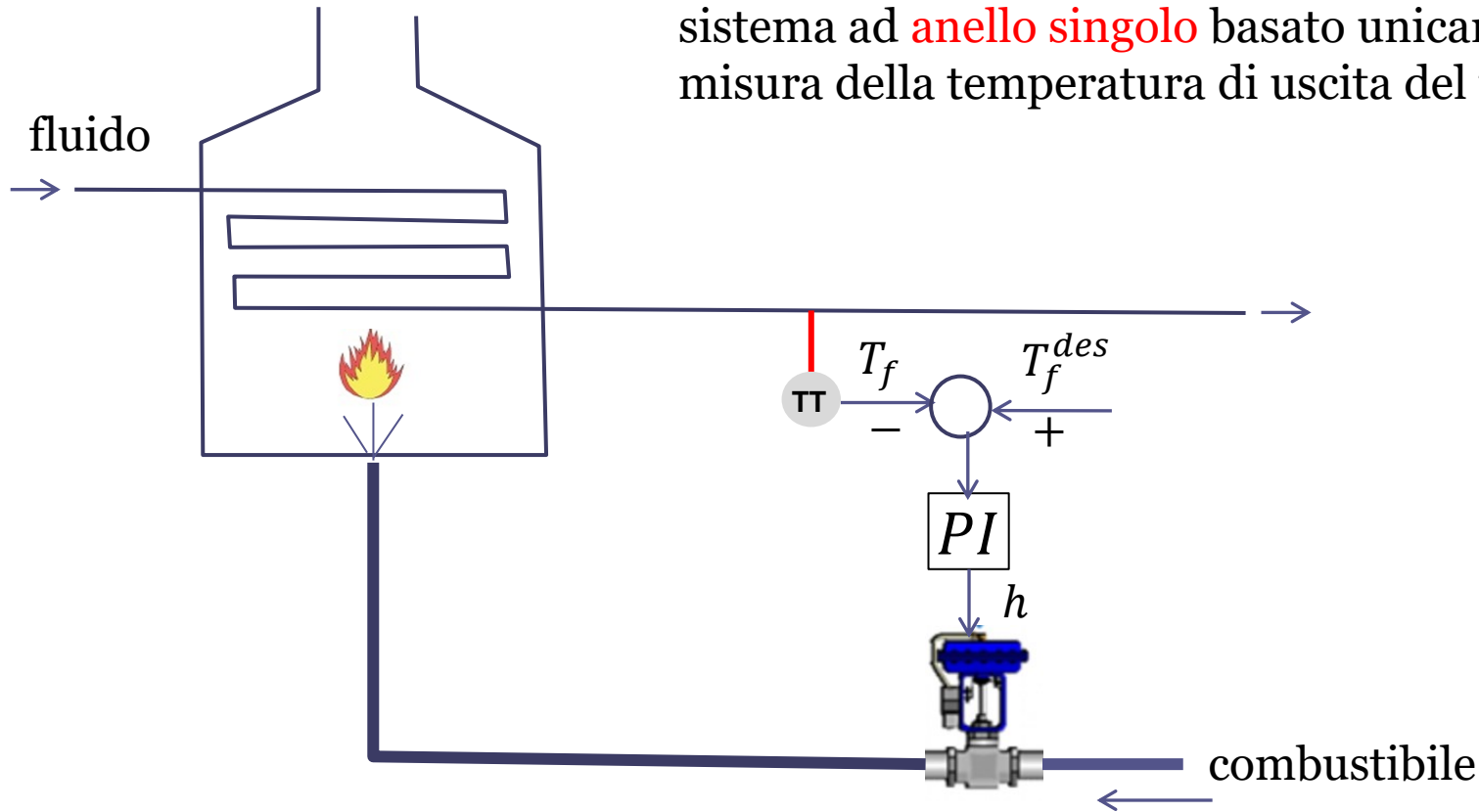
## Scelta della variabile ausiliaria

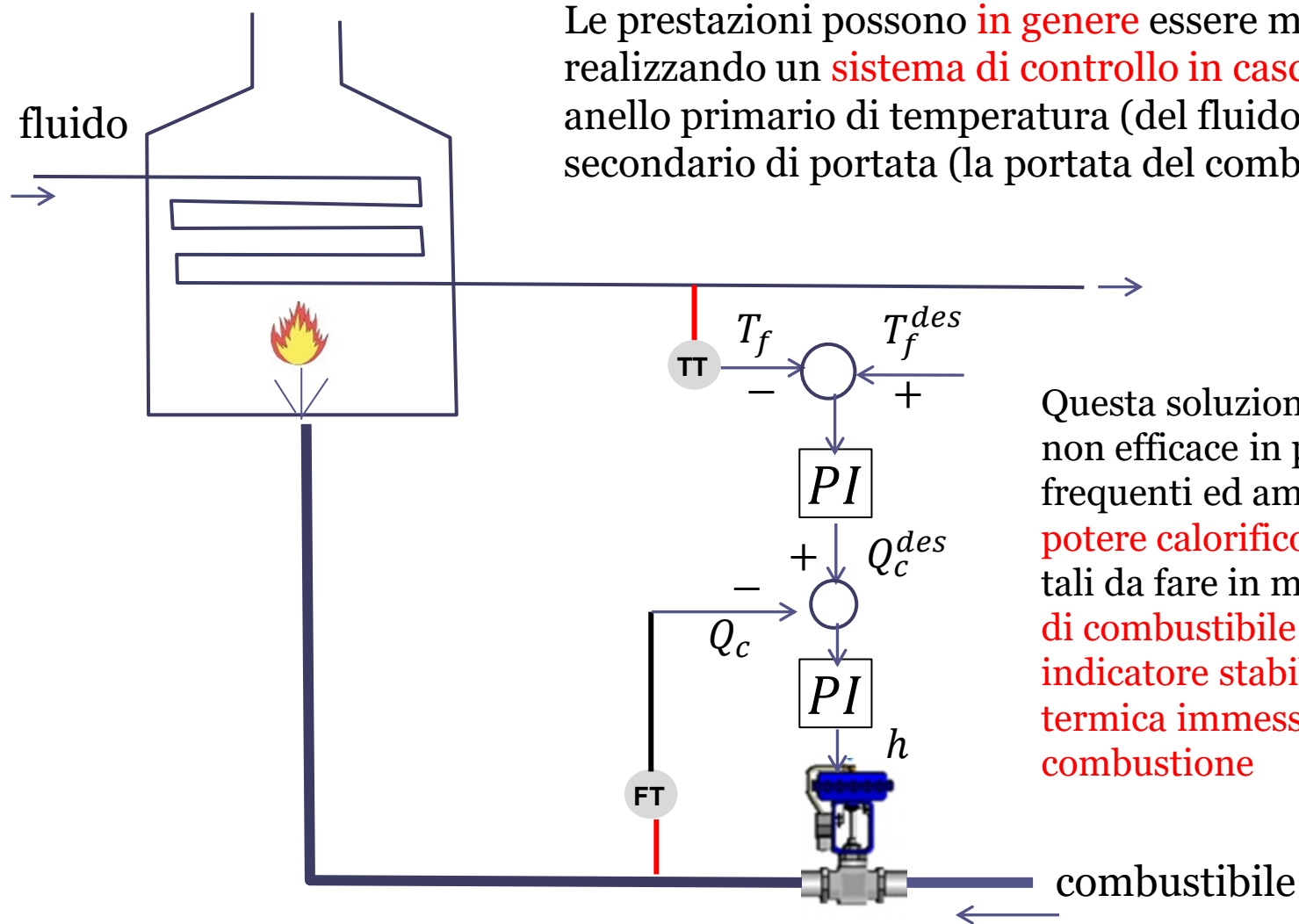
Non è sempre evidente quale sia la variabile ausiliaria più indicata per l'implementazione di un sistema di controllo in cascata.

Un esempio illustrativo di tale problematica è uno scambiatore di calore in cui si desidera riscaldare un fluido direttamente investito da fiamma e fumi.



La prima e più banale configurazione che si potrebbe ipotizzare per il relativo sistema di controllo è un sistema ad **anello singolo** basato unicamente sulla misura della temperatura di uscita del fluido





Le prestazioni possono **in genere** essere migliorate realizzando un **sistema di controllo in cascata** con anello primario di temperatura (del fluido) ed anello secondario di portata (la portata del combustibile)

Questa soluzione potrebbe risultare non efficace in presenza di frequenti ed ampie **variazioni del potere calorifico del combustibile**, tali da fare in modo che **la portata di combustibile non sia più un indicatore stabile della potenza termica immessa in camera di combustione**

Una soluzione alternativa da adottarsi in presenza di ampie e frequenti variazioni del potere calorifico del combustibile, potrebbe prevedere la richiusura di un anello secondario non più di portata ma di temperatura, in particolare misurando la **temperatura dei fumi al camino**

