

# Presentazione esercitazioni MSSF

esame finale per l'A.A. 24/25

Lorenzo Casavecchia, matricola 0350001  
lorenzo.casavecchia@students.uniroma2.eu

Ingegneria dell'Automazione

24/07/2025



**TOR VERGATA**  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

## 1 Assignment 1 - Modello della meccanica respiratoria

# Modello della meccanica respiratoria

## Obiettivi

- Implementare il modello della meccanica respiratoria riportato a lezione
- Comparare gli andamenti dei volumi e dei flussi tra
  - ▶ pressioni sinusoidali vs pressioni ad onda quadra
  - ▶ caso fisiologico vs in presenza di patologie respiratorie

# Modello della meccanica respiratoria

## Modello di riferimento

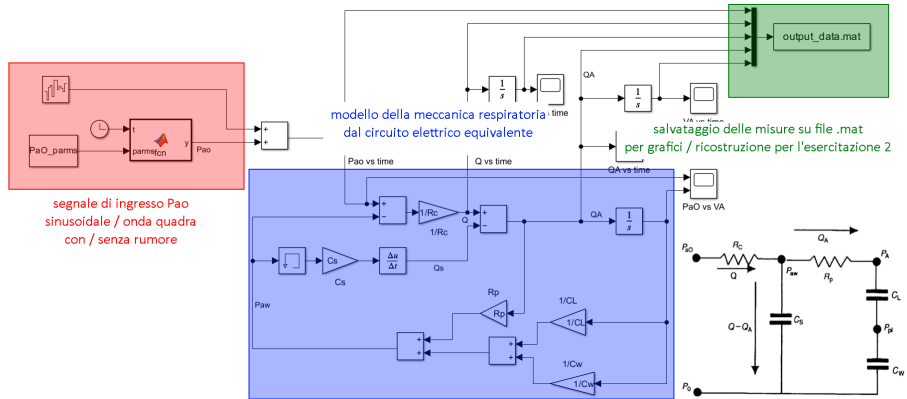


Figure 1: Modello Simulink e circuito equivalente per la meccanica respiratoria

# Modello della meccanica respiratoria

## Variabili del modello

### Notazione

- Pressione alla via aerea d'ingresso  $P_{ao}$
- Pressione alla via aerea principale  $P_{aw}$
- Flusso d'aria totale  $Q$
- Volume d'aria  $V$
- Flusso d'aria agli alveoli  $Q_A$
- Volume d'aria agli alveoli  $V_A$

# Modello della meccanica respiratoria

## Parametri del modello

### Costanti del modello

- Ostruzione alle vie aeree periferiche  $R_p$  ( $1 \frac{\text{cmH}_2\text{O}}{\text{litre}}\text{s}$ )
- Ostruzioni alla via aerea principale  $R_c$  ( $0.5 \frac{\text{cmH}_2\text{O}}{\text{litre}}\text{s}$ )
- Compliance delle vie aeree secondarie  $C_s$  ( $0.005 \text{ cmH}_2\text{O} \cdot \text{litre}$ )
- Compliance del petto  $C_w$  ( $0.2 \text{ cmH}_2\text{O} \cdot \text{litre}$ )
- Compliance dei polmoni  $C_L$  ( $0.2 \text{ cmH}_2\text{O} \cdot \text{litre}$ )

# Modello della meccanica respiratoria

Simulazione con  $P_{ao}$  sinusoidale

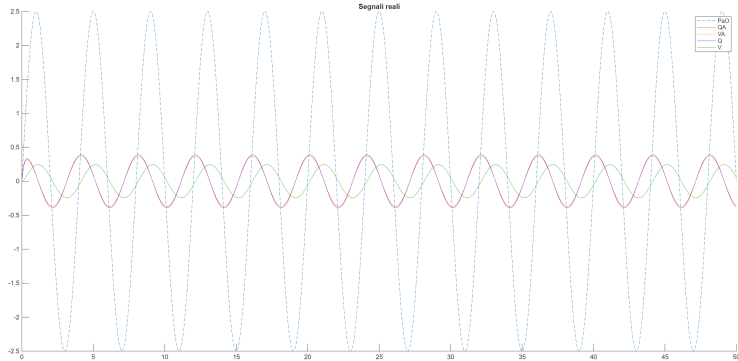


Figure 2:  $P_{ao} = 2.5 \sin(2\pi \cdot 0.25 \frac{1}{s} \cdot t)$  cmH<sub>2</sub>O

# Modello della meccanica respiratoria

$P_{ao}$  ad onda quadra

## Parametri per $P_{ao}$ ad onda quadra

- $A = 1 \text{ cmH}_2\text{O}$
- $\tau = 0.5 \text{ s}, T_i = 1.7 \text{ s}, T_e = 3.3 \text{ s} (T_{\text{breath}} = 5.5 \text{ s})$

- $\text{PEEP} = 0$

i parametri differiscono di molto da quelli proposti in Noman Qaed 2015,  $A = 25 \text{ cmH}_2\text{O}$ ,  $\text{PEEP} = 6 \text{ cmH}_2\text{O}$  e  $T_{\text{breath}} = 3 \text{ s}$ , ma la risposta nel tempo presenta le stesse caratteristiche

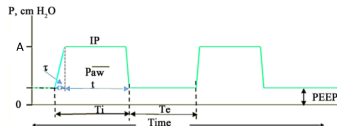
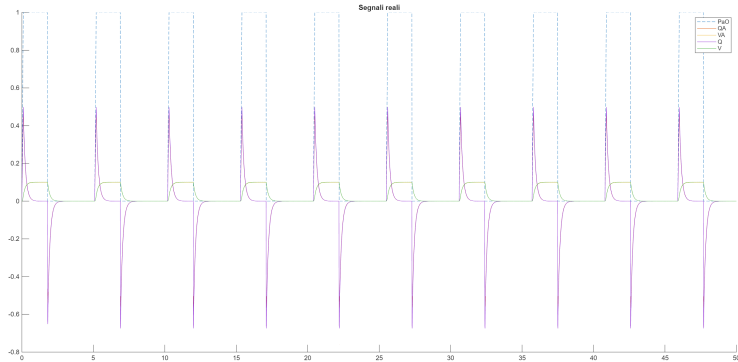


Figure 3: Forma dell'onda quadra adottata per le simulazioni



# Modello della meccanica respiratoria

Simulazione con  $P_{ao}$  ad onda quadra



# Modello della meccanica respiratoria

Simulazione con  $P_{ao}$  ad onda quadra

## Nota

- Per  $P_{ao}$  sinusoidale abbiamo che  $Q, Q_A, V, V_A$  sono a regime sinusoidali (per sistemi lineari ingresso sinusoidale  $\implies$  uscita sinusoidale con ampiezza e fase proporzionali a quelli d'ingresso e alla frequenza)
- In entrambi i casi  $Q \approx Q_A$  in quanto  $C_s$  è molto piccola  $\implies$  la portata d'aria che arriva alle vie centrali raggiunge del tutto gli alveoli
- Per  $P_{ao}$  ad onda quadra la risposta dei flussi d'aria  $Q, Q_A$  è molto più aggressiva di quella dei volumi  $V, V_A$

# Modello della meccanica respiratoria

tf di  $Q_A/P_{ao}$

## Analisi orientata alle tf

Per caratterizzare la differenza dei comportamenti rispetto alle 2  $P_{ao}$  di riferimento calcoliamo le funzioni di trasferimento (tf) tra le misure di interesse e  $P_{ao}$

Dal circuito elettrico abbiamo

$$\begin{cases} Q_A &= sC_s P_{aw} + \frac{1}{R_c} P_{ao} - \frac{1}{R_c} P_{aw} \\ P_{aw} &= R_p Q_A + C_{L||w} \frac{1}{s} Q_A \end{cases} \Rightarrow \frac{Q_A}{P_{ao}} = \frac{s}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$$

dove  $a_2 = R_c R_p C_s$ ,  $a_1 = R_c + R_p + R_c C_s C_{L||w}$  e  $a_0 = C_{L||w}$

# Modello della meccanica respiratoria

tf di  $Q_A/P_{ao}$

Inoltre

$$\begin{cases} \frac{Q_A}{P_{ao}} = \frac{s}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \\ \frac{V_A}{P_{ao}} = \frac{1}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \\ \frac{Q}{P_{ao}} = \frac{1}{R_c} \left( 1 - \frac{P_{aw}}{P_{ao}} \right) \\ \frac{V}{P_{ao}} = \frac{1}{R_c} \frac{1}{s} \left( 1 - \frac{P_{aw}}{P_{ao}} \right) \end{cases}$$

## Nota

- Le tf sono di grado 2 (2 poli e  $\leq 2$  zeri) e si può verificare che i poli sono gli stessi (zeri di  $a_2 s^2 + a_1 s + a_0$ , entrambi stabili dal criterio di Cartesio  $\Rightarrow$  **no instabilità da risonanze**)
- Poli uguali  $\Rightarrow$  le proprietà di stabilità (a  $P_{ao} = 0$ ) sono le stesse per  $Q, Q_A, V, V_A$

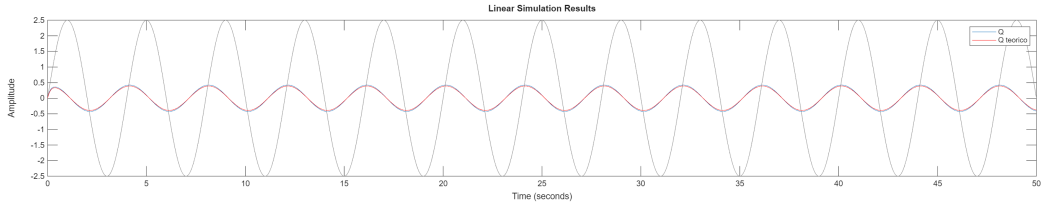
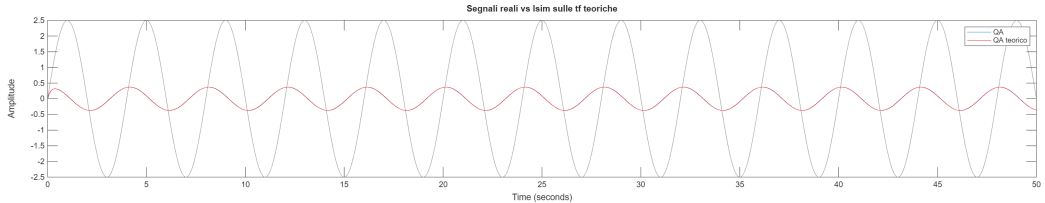
# Modello della meccanica respiratoria

Zeri delle  $\tau f$

- Inoltre lo zero all'origine per  $Q, Q_A$  rende i flussi d'aria sensibili a ripidi cambiamenti nella pressione  $P_{ao}$
- Infine lo zero in  $-\frac{C_L C_s + C_L C_w + C_s C_w}{C_L C_s C_w R_p}$  di  $Q, V$  può soltanto cambiare la banda passante e il guadagno a bassa frequenza

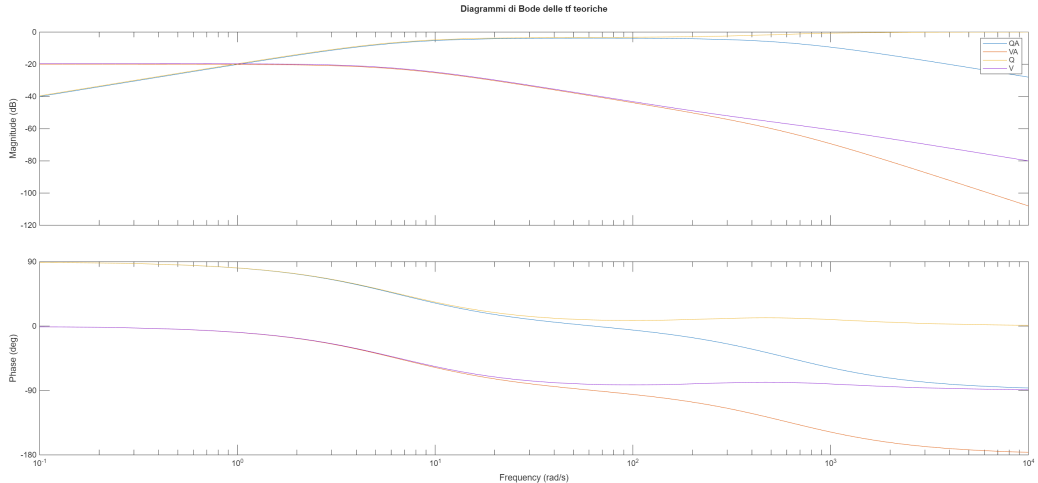
# Modello della meccanica respiratoria

Risposte nel tempo ( $P_{ao}$  sinusoidale)



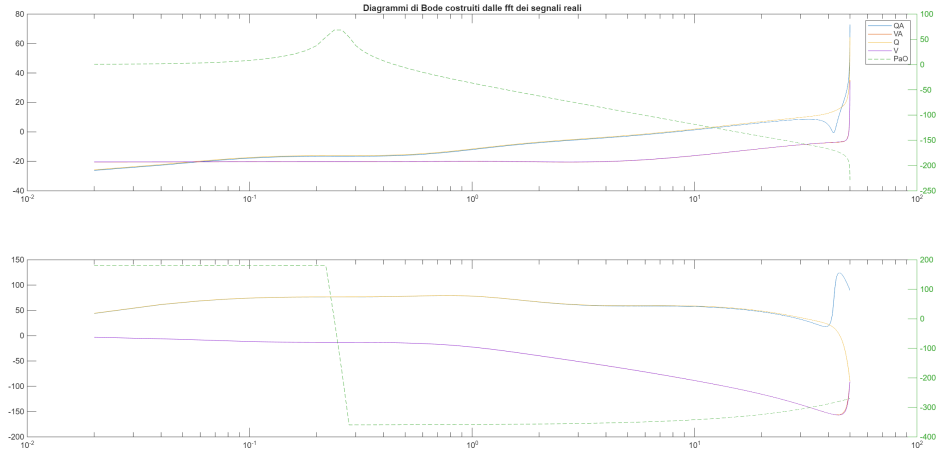
# Modello della meccanica respiratoria

## Diagramma di Bode teorico ( $P_{ao}$ sinusoidale)



# Modello della meccanica respiratoria

Diagrammi di Bode estratto dalla simulazione ( $P_{ao}$  sinusoidale)





# Modello della meccanica respiratoria

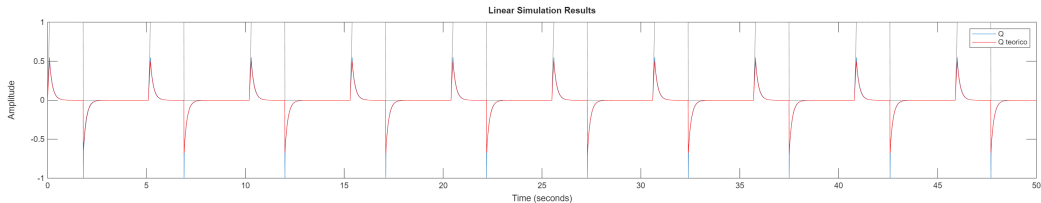
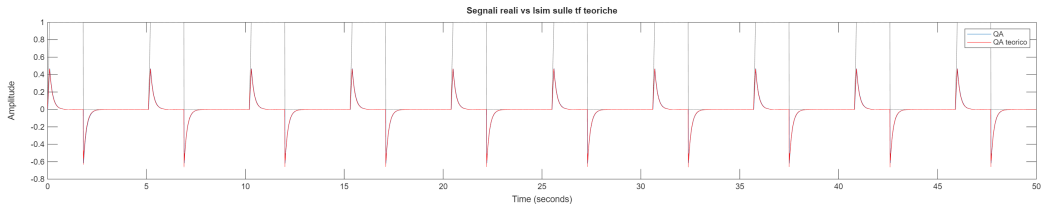
Osservazioni per i risultati con  $P_{ao}$  sinusoidale

## Nota

- La simulazione nel tempo rispetta quasi perfettamente i dati reali
- Il diagramma di Bode si discosta di molto dal comportamento previsto in quanto
  - ▶  $P_{ao}$  sinusoidale  $\implies$  l'unica componente "affidabile" nella trasformata di Fourier di  $P_{ao}, Q, Q_A, V, V_A$  è la pulsazione di  $P_{ao}$
  - ▶ nonostante le differenze l'andamento a bassa frequenza, così come la sovrapposizione (e discostamento) tra  $Q, Q_a$  e  $V, V_A$  sulla banda studiata sono fedeli al modello reale

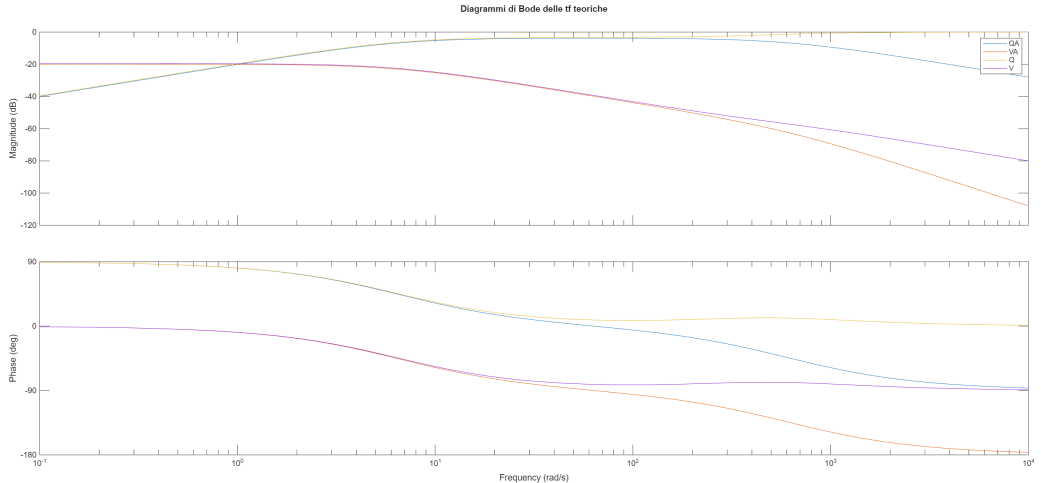
# Modello della meccanica respiratoria

Risposte nel tempo ( $P_{ao}$  ad onda quadra)



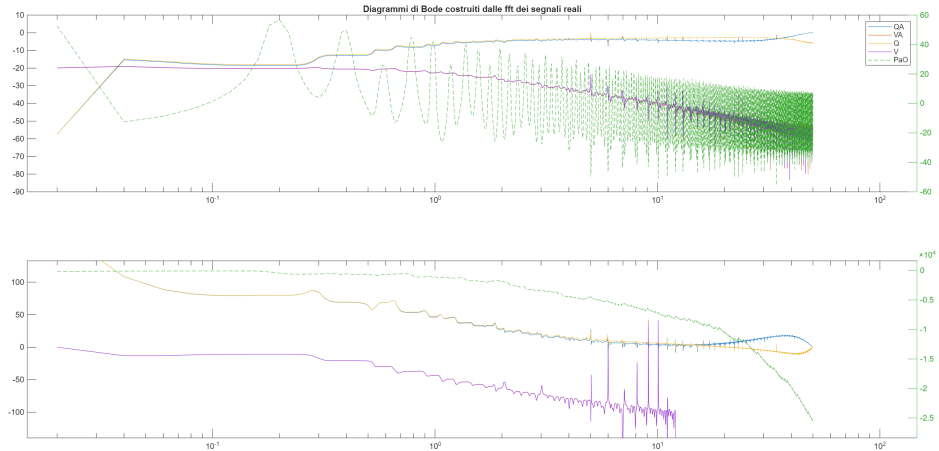
# Modello della meccanica respiratoria

## Diagramma di Bode teorico ( $P_{ao}$ ad onda quadra)



# Modello della meccanica respiratoria

Diagrammi di Bode estratto dalla simulazione ( $P_{ao}$  ad onda quadra)



# Modello della meccanica respiratoria

Osservazioni per i risultati con  $P_{ao}$  ad onda quadra)

## Nota

- La simulazione nel tempo rispetta quasi perfettamente i dati reali
- Il diagramma di Bode è più fedele rispetto a  $P_{ao}$  sinusoidale (il supporto spettrale comprende infinite frequenze intervallate a multipli interi)
- Anche se non riportato nelle slide, si vede che l'introduzione di rumore nella  $P_{ao}$  migliora ancora più l'accuratezza del diagramma di Bode

Per discutere l'effetto di variazioni parametriche dovute a patologie respiratorie possiamo collegarci all'effetto che questi hanno sulle singole  $tf$

# Modello della meccanica respiratoria

Variazioni parametriche dovute all'asma

## Asma

Malattia respiratoria ostrusiva in cui la variazione di volume nelle vie aeree è ridotta rispetto al caso fisiologico, a parità di flusso d'aria

La diagnosi di malattie ostrusive tramite **spirometria** prevede anche la misura di

- $FEV_1$  volume d'aria espulsa con forza in 1 secondo, dopo una ispirazione profonda
- $FVC$  volume d'aria espulsa con forza, tipicamente in almeno 6 secondi e dopo una ispirazione profonda

Effetti misurabili con  $FEV_1$  su scale temporali più brevi rispetto a  $FVC$ , + nell'asma la riduzione in  $FEV_1$  è più grande di quella in  $FVC \implies$  incremento di  $R_p, R_c$

# Modello della meccanica respiratoria

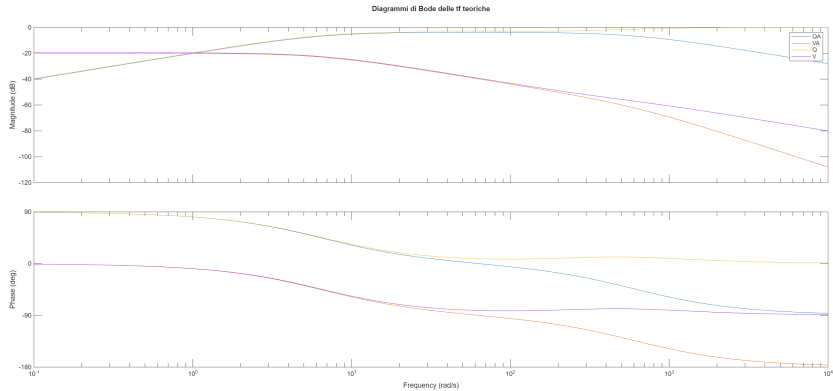
## Effetto dell'aumento nella resistività

L'incremento di  $R_p, R_c$

- porta lo zero di  $Q, V$  verso frequenze più basse  $\implies$  la banda passante di  $Q$  (passa-alto) aumenta
- sposta i poli della tf a ciclo chiuso verso l'origine  $\implies$  guadagno di  $Q_A, V_A$  più basso e diminuzione della banda passante

# Modello della meccanica respiratoria

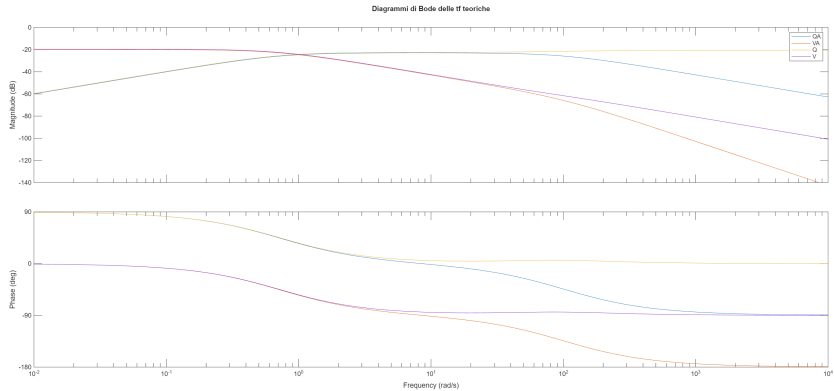
Diagrammi di Bode con  $\delta R_p = 0, \delta R_c = 0$





# Modello della meccanica respiratoria

Diagrammi di Bode con  $\delta R_p = 4R_p$ ,  $\delta R_c = 10R_c$



# Modello della meccanica respiratoria

Variazioni parametriche dovute a fibrosi polmonare

## Fibrosi polmonare

Malattia polmonare cronica restrittiva con cicatrizzazione della parete polmonare

A differenza dell'asma, nella fibrosi polmonare  $FEV_1$  e FVC sono ridotti proporzionalmente rispetto al caso fisiologico, e la diagnosi si svolge con tomografie o broncoscopie (visive e non correlate a misure della pressione o del flusso d'aria ai polmoni o alle vie aeree principali)

## Nota

I meccanismi della respirazione dipendono da

$R_c R_p C_s, R_c + R_p + R_c C_s C_{L||w}, C_{L||w}, -\frac{C_L C_s + C_L C_w + C_s C_w}{C_L C_s C_w R_p}$  ma non dalle singole resistenze o compliances  $\Rightarrow$  diverse quadruple  $(R_p, R_c, C_s, C_L, C_w)$  possono corrispondere a stesse tf