

Modellistica grafica di sistemi fisici: confronto tra le tecniche Bond Graphs e Power-Oriented Graphs



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI MODENA E REGGIO EMILIA

R. Zanasi

Computer Science Engineering Department (DII)
University of Modena and Reggio Emilia
Italy

E-mail: roberto.zanasi@unimore.it

$$\begin{bmatrix} K_{12}^4 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_{23}^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{f}_{12} \\ \dot{\omega}_2 \\ \dot{f}_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g_{12} & -R_2^T & 0 \\ R_2 & -b_2 & -r_3 \\ 0 & r_2 & -g_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{12} \\ \omega_2 \\ f_{23} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ -R_3^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_m \\ \omega_p \end{bmatrix}$$

Tecniche di Modellistica grafica

Esistono varie tecniche per rappresentare **graficamente** la dinamica dei sistemi fisici:

- 1) Bond-Graph (**BG**) – (1959)
- 2) Power-Oriented Graphs (**POG**) - 1991
- 3) Energetic Macroscopic Representation (**EMR**) – 2001
- 4) Causal Ordering Graphs (**COG**) - 2000
- 5) Vectorial Bond Graphs (**VBG**)
- 6) ... (F.d.T., G.f.s., ecc.)

Le tecniche BG, POG, EMR e VBG mettono anche in evidenza i flussi di potenza presenti all'interno del sistema.

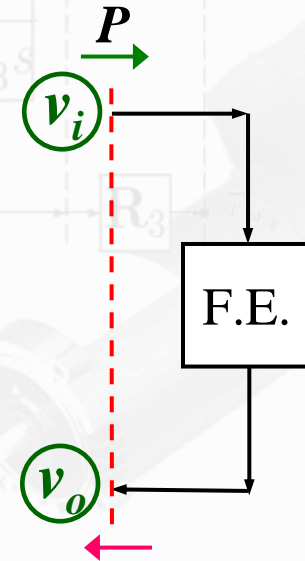
Questa presentazione metterà a confronto alcuni vantaggi e svantaggi delle tecniche **BG** e **POG**.

Modellistica dinamica: variabili di potenza

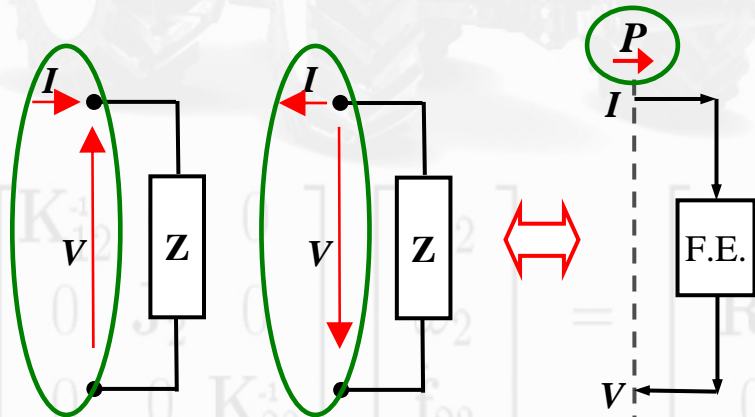
Le tecniche modellistiche **BG** e **POG** si basano sull'uso delle variabili di **Potenza** e delle variabili **Energia**.

Gli elementi fisici (F.E.) interagiscono con il mondo esterno tramite sezioni fisiche caratterizzate da due variabili di potenza v_i e v_o .

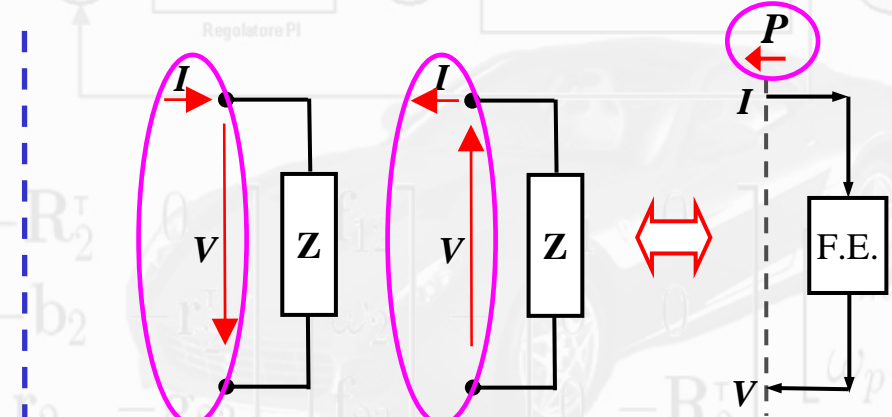
Ciascuna variabile di potenza ha una propria direzione positiva di riferimento. La potenza P che entra nell'elemento fisico può essere positiva o negativa.



La potenza entra nell'elemento:



La potenza esce dall'elemento:



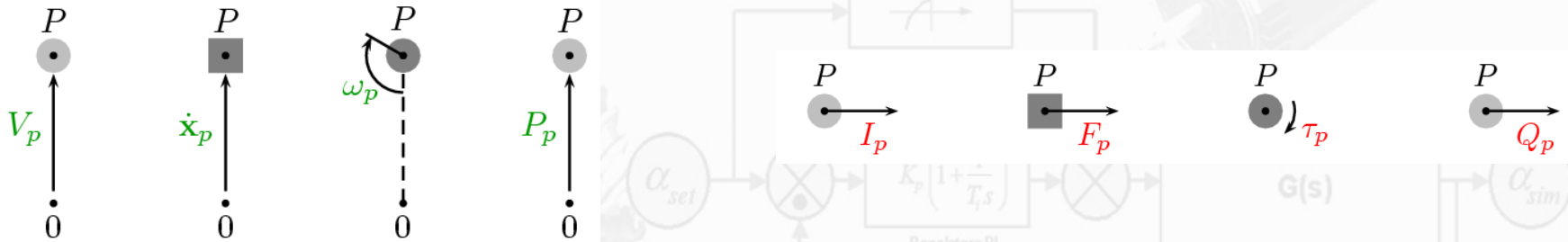
Modellistica Dinamica dei Sistemi Fisici

Domini Energetici: 1) Elettrico; 2) Meccanico (tras./rot.); 3) Idraulico; etc.

Hanno tutti la stessa struttura dinamica:

- 2 elementi "dinamici" D_e, D_f che immagazzinano energia;
- 1 elemento "statico" R dissipa (o genera) energia;
- 2 "variabili energia" $q_e(t), q_f(t)$ per descrivere l'energia **accumulata**;
- 2 "variabili di potenza" $v_e(t), v_f(t)$ per descrivere l'energia **che si sposta**;

Trans-variabili $v_e(t)$ definite tra due punti: Per-variabili $v_f(t)$ definite in un punto:

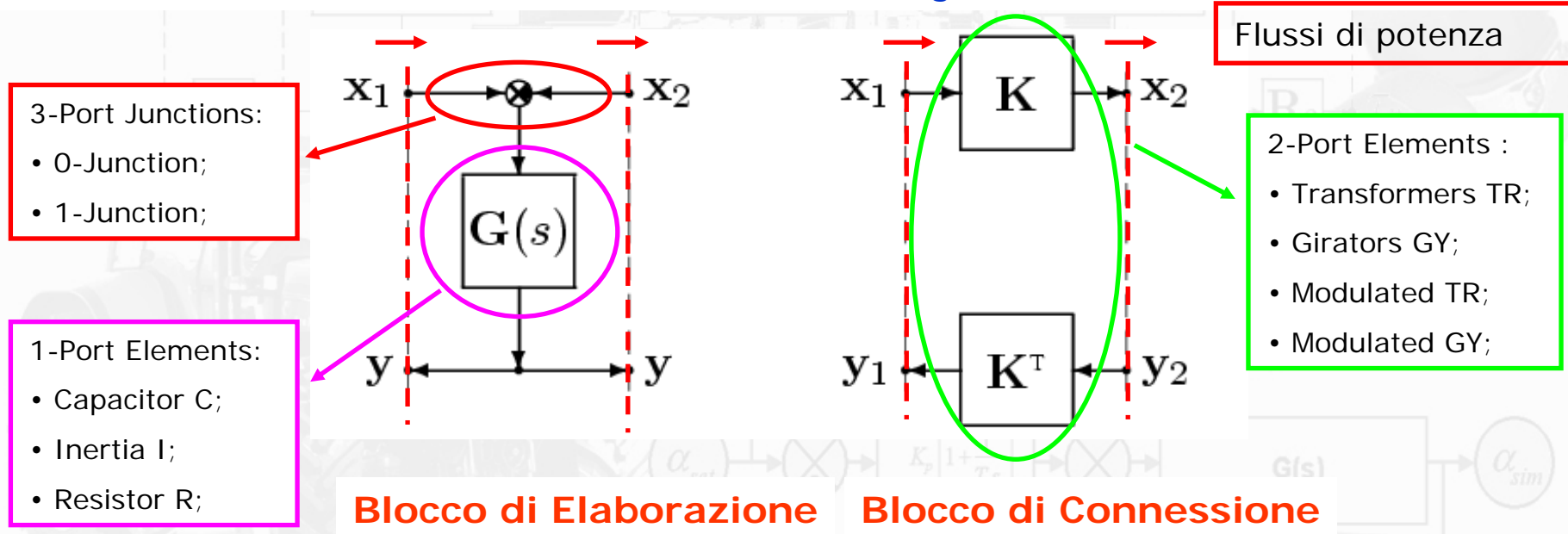


POG:

	Electrical	Mech. Tras.	Mech. Rot.	Hydraulic
\mathcal{D}_e	C Capacitor	M Mass	J Inertia	C_I Hyd. Capacitor
q_e	Q Charge	p Momentum	p Ang. Momentum	V Volume
Trans-variabili (Across-variables)	v_e V Voltage	v Velocity	ω Ang. Velocity	P Pressure
	\mathcal{D}_f L Inductor	E Spring	E Spring	L_I Hyd. Inductor
	q_f ϕ Flux	x Displacement	θ Ang. Displacement	ϕ_I Hyd. Flux
Per-variabili (Through-variables)	v_f I Current	F Force	τ Torque	Q Volume flow rate
	\mathcal{R} R Resistor	b Friction	b Ang. Friction	R_I Hyd. Resistor

Power-Oriented Graphs (POG) - 1991

I Power-Oriented Graphs sono "diagrammi a blocchi" ottenuti utilizzando una struttura "modulare" essenzialmente basata sui seguenti due blocchi:



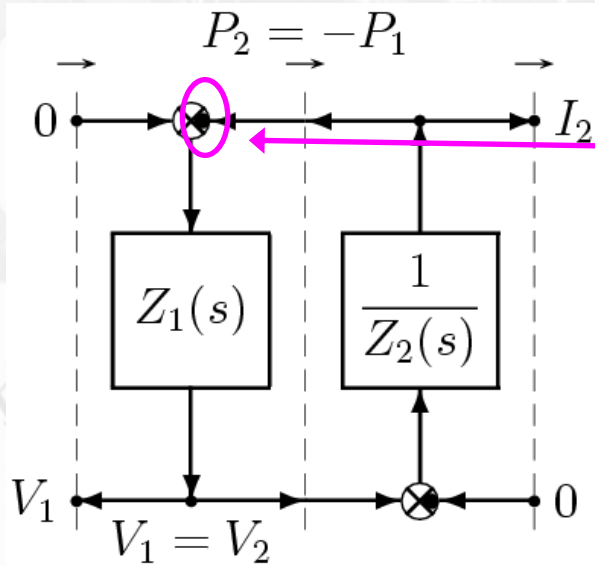
- I POG mantengono una diretta corrispondenza tra le sezioni dello schema e le reali sezioni fisiche: il prodotto delle due variabili toccate dalla linea tratteggiata ha il significato fisico di "potenza che fluisce attraverso quella sezione".
- Il blocco di Elaborazione può solo accumulare e/o dissipare l'energia.
- Il blocco di Connessione può solo "trasformare" l'energia.

Modelli dinamici POG: connessioni

Esempio: connessione fra due elementi elettrici Z_1 , Z_2 .

Se entrambe le potenze P_1 e P_2 sono **"entranti"** nell'elemento fisico, le variabili I_1 , V_1 , I_2 e V_2 non possono avere tutte la stessa direzione positiva di riferimento.

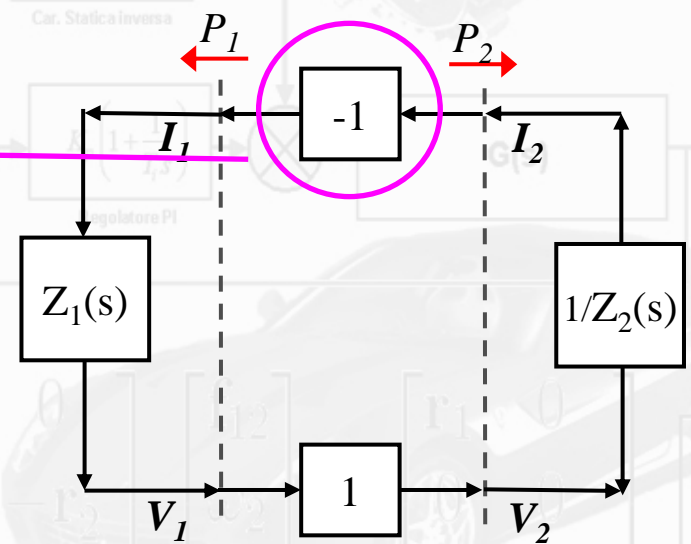
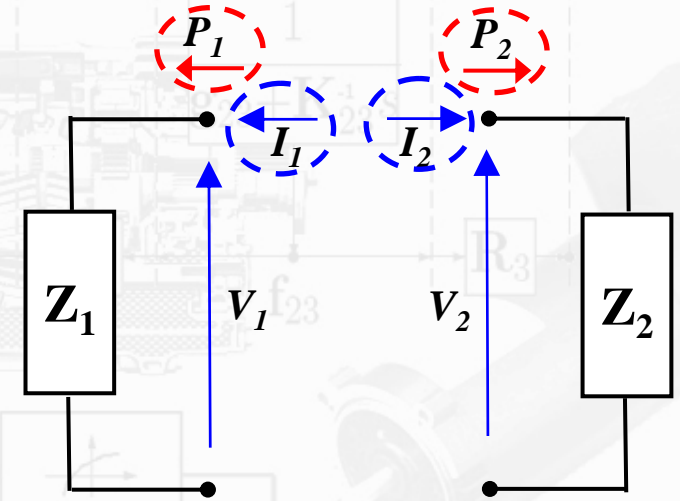
Quando i due elementi vengono **"collegati"** una delle due variabili di potenza deve cambiare di segno.



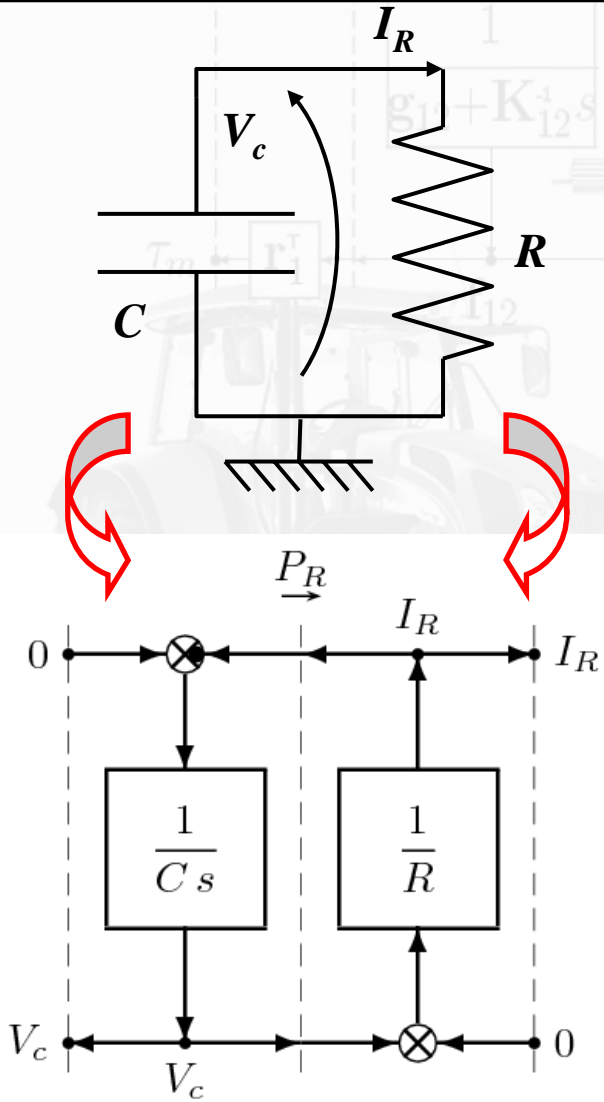
Modello POG



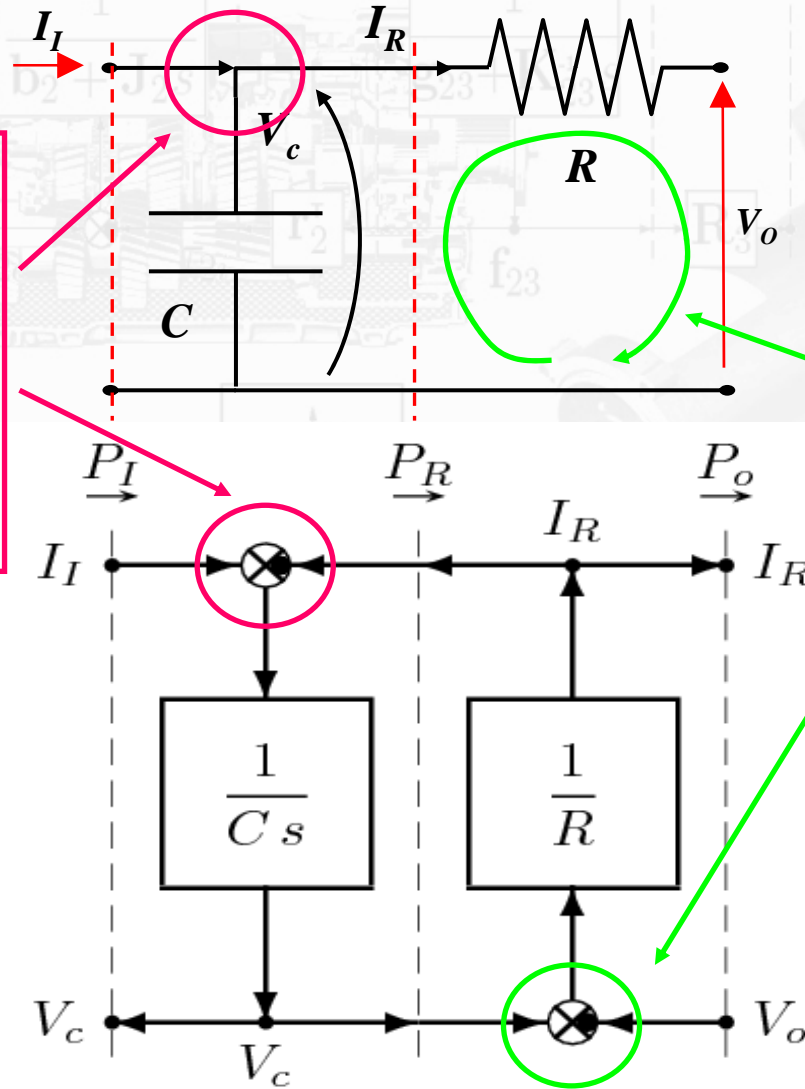
Il segno "-" viene messo nel sommatore



Modellistica dinamica: esempi elettrici



Legge di Kirchhoff ai nodi



Legge di Kirchhoff alle maglie

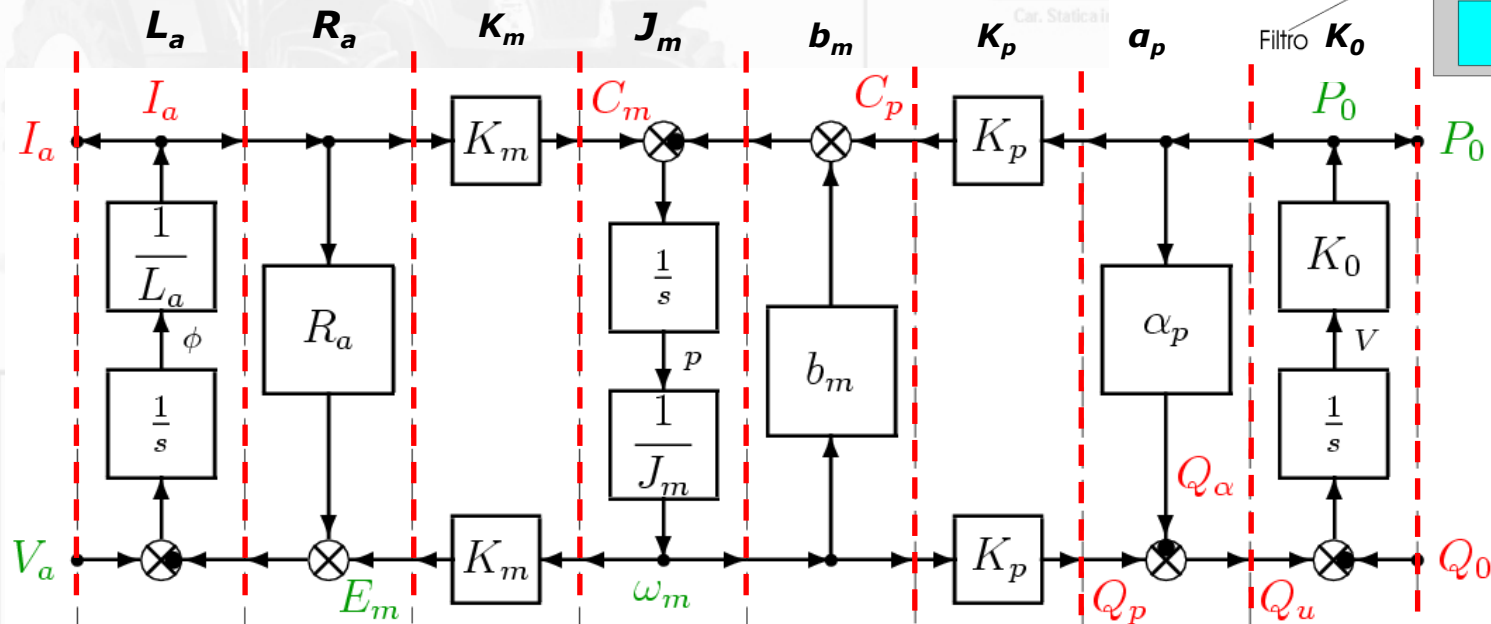
Esempio di modellistica POG: motore elettrico DC collegato ad una pompa idraulica

Motore elettrico collegato ad una pompa idraulica:

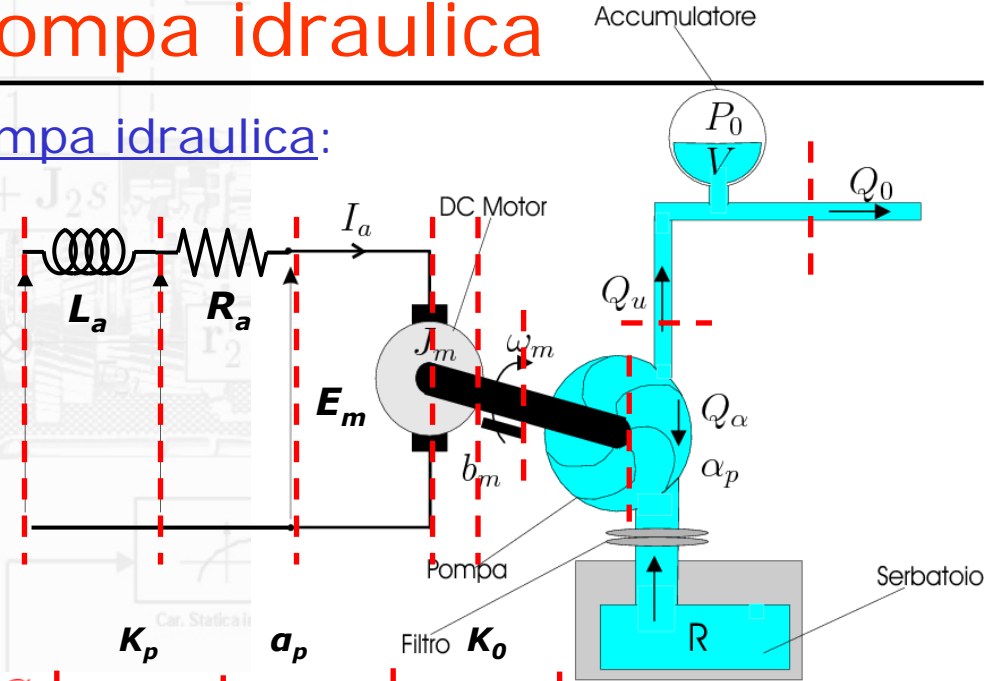
Esiste una diretta corrispondenza tra i blocchi POG e gli elementi fisici.

Lo schema a blocchi è comprensibile anche a chi non conosce i POG!

Lo schema a blocchi POG:



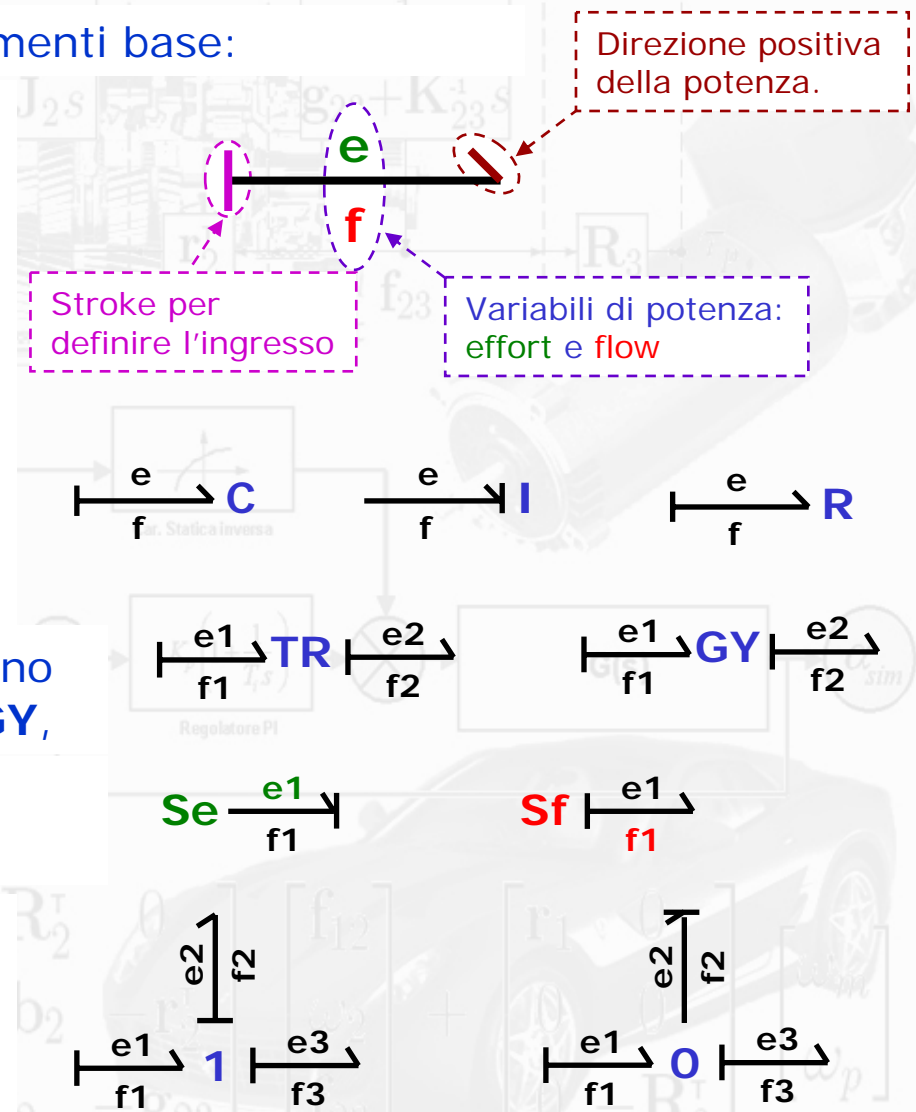
Lo schema POG è direttamente utilizzabile in Simulink



Bond Graphs (BG) -1959

I Bond Graphs si basano sui seguenti elementi base:

- Una linea rappresenta il "bond": **effort** sopra e il **flow** sotto la linea.
- Una **semifreccia** indica la direzione positiva della potenza.
- Uno **stroke** distingue la variabile di ingresso da quella di uscita.
- Tre elementi base a **1-porta** che accumulano e/o dissipano l'energia: capacità **C**, inerzia **I** e resistenza **R**.
- Due elementi a **2-porte** che trasformano la potenza: trasformatore **TR**, giratore **GY**,
- Due blocchi per definire l'ingresso: sorgente effort **Se**, sorgente flow **Sf**,
- Due giunzioni a **3-porte** per collegare gli elementi base: giunzione **0** per la connessione in parallelo; giunzione **1** per la connessione in serie.

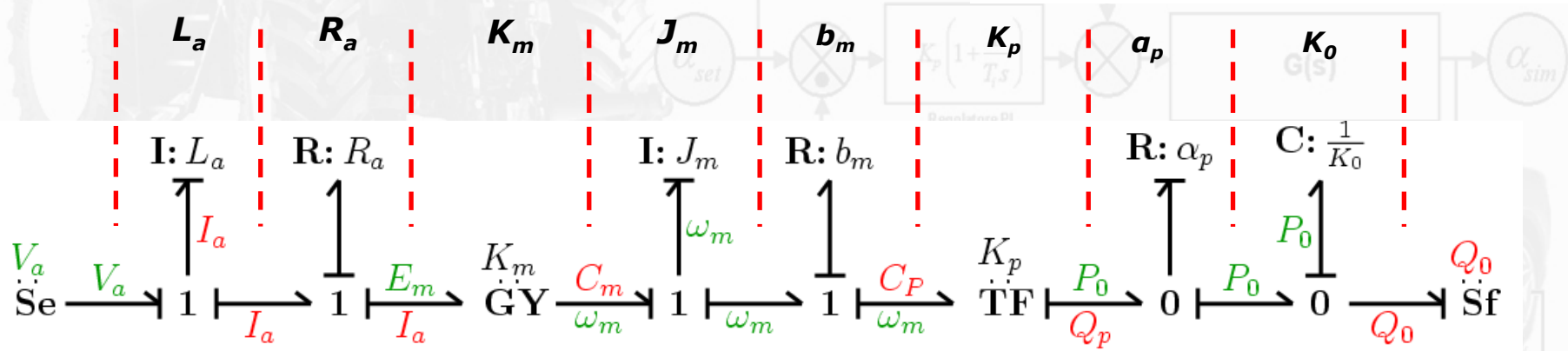
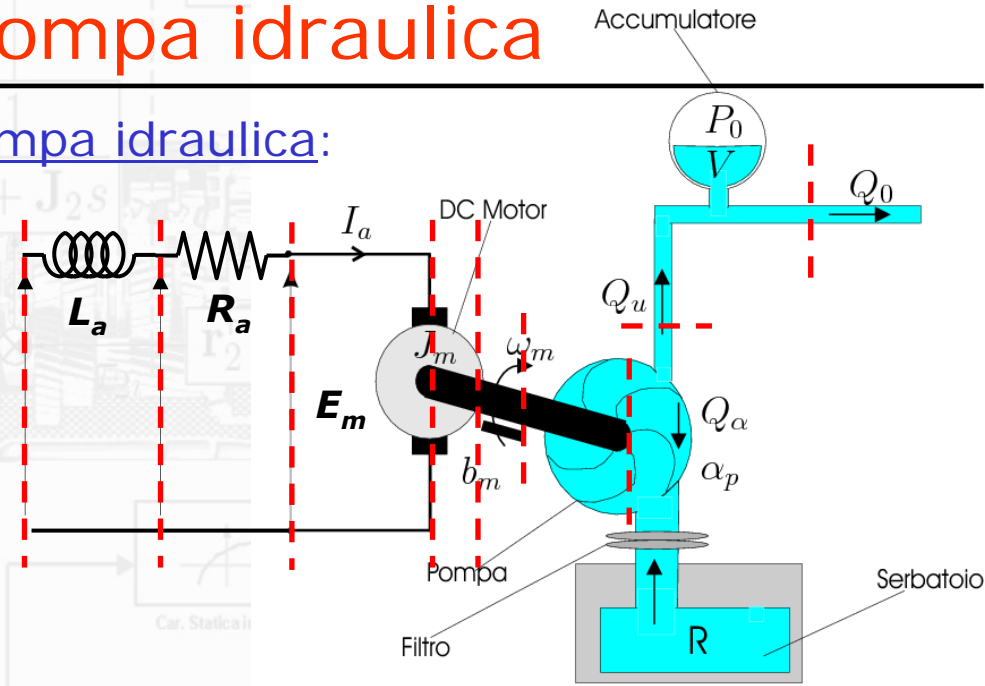


Esempio di modellistica BG: motore elettrico DC collegato ad una pompa idraulica

Motore elettrico collegato ad una pompa idraulica:

Esiste una diretta corrispondenza tra i simboli BG e gli elementi fisici...

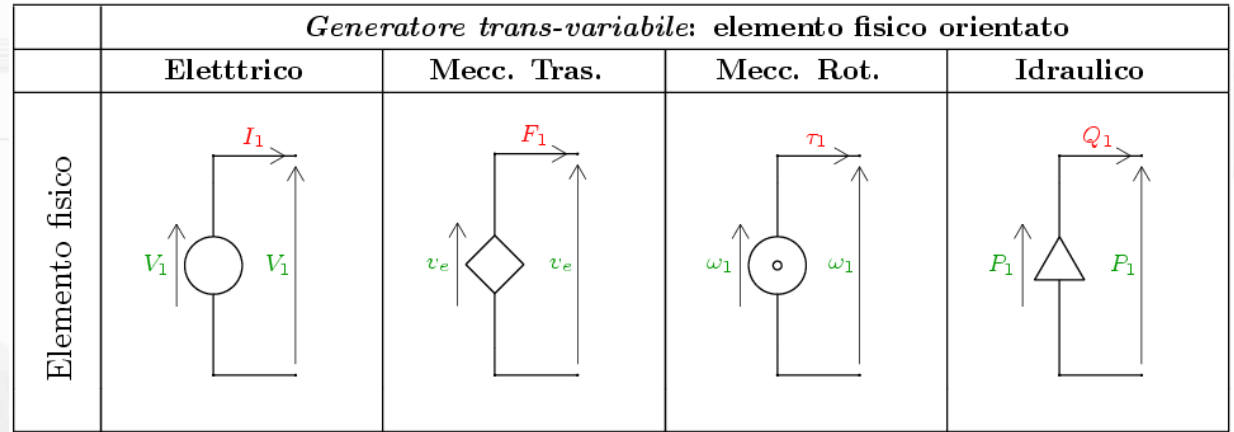
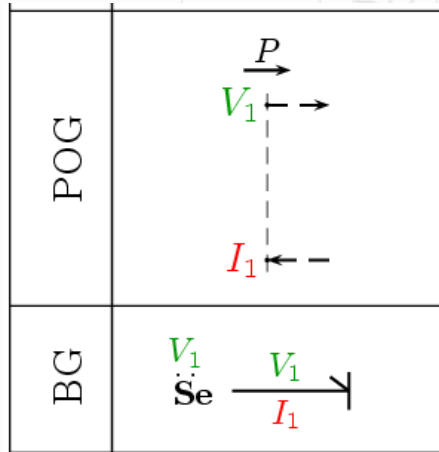
Lo schema grafico BG:



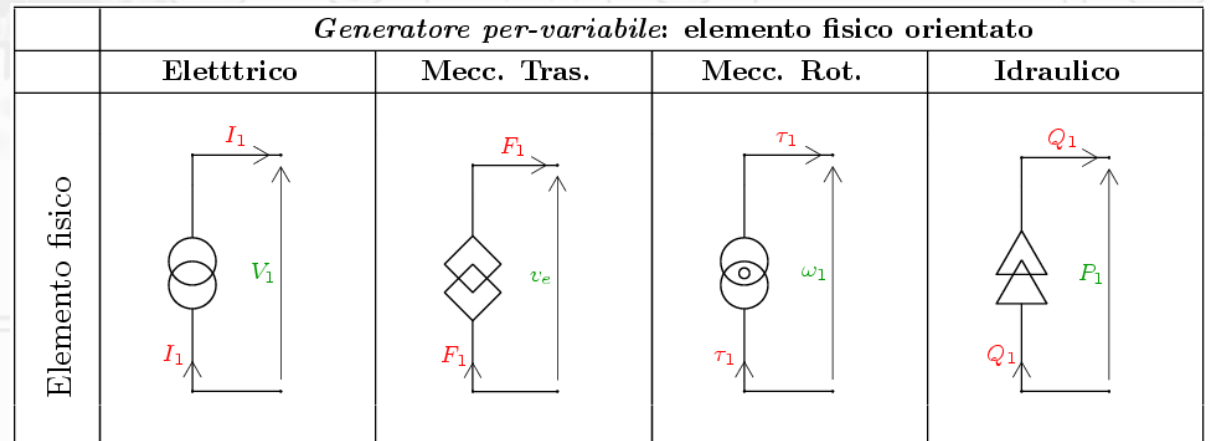
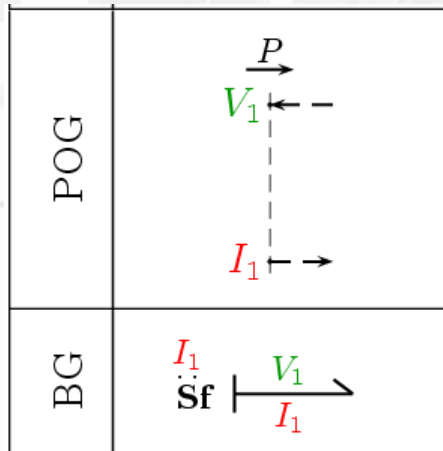
La rappresentazione grafica è chiara solo per chi conosce i Bond Graphs!

BG e POG: Generatori

Generatori di "trans-variabile" / ("effort"):

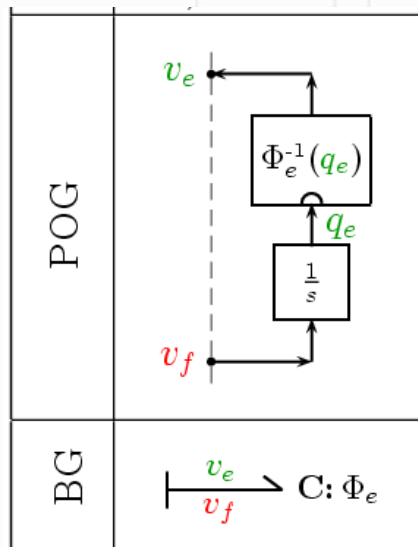


Generatori di "per-variabile" / ("flow"):



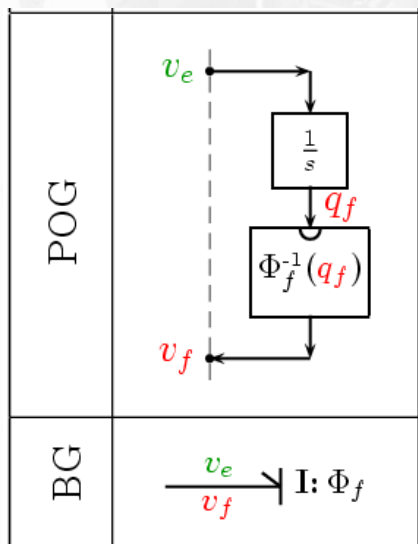
BG e POG: Elementi Dinamici

"Capacità": integrano la "per-variabile" / "flow"



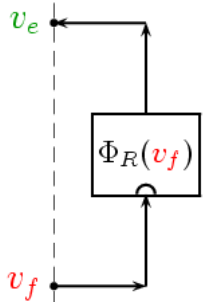
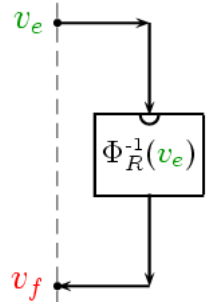
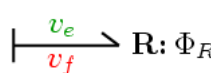
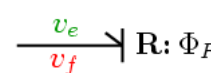
Capacità: elemento fisico non orientato				
	Elettrico	Mecc. Tras.	Mecc. Rot.	Idraulico
Elemento fisico				

"Induttanza": integrano la "trans-variabile" / "effort"



Induttanza: elemento fisico non orientato				
	Elettrico	Mecc. Tras.	Mecc. Rot.	Idraulico
Elemento fisico				

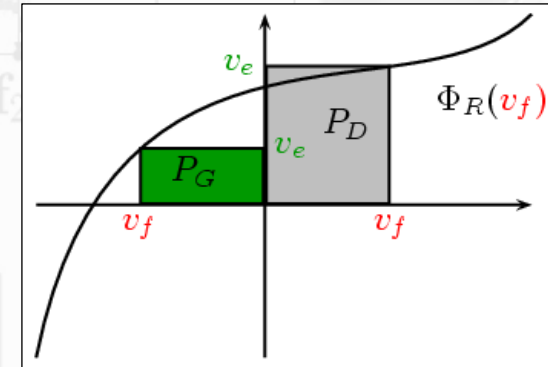
BG e POG: Dissipatori

	1) Resistenza	2) Conduttanza
POG		
BG		

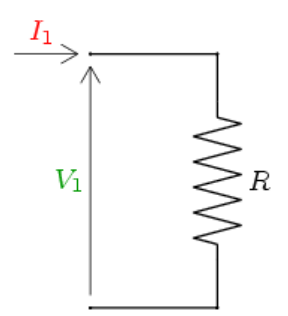
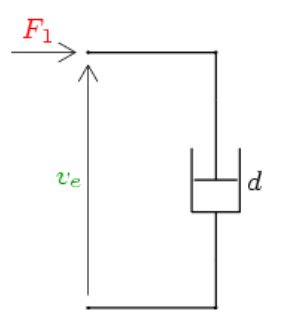
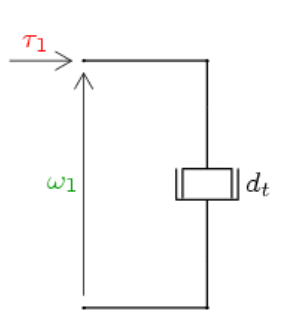
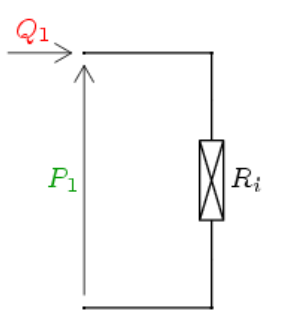
Dissipatore: legame statico che lega:
 "trans-variabile" \leftrightarrow "per-variabile" /
 "effort" \leftrightarrow "flow".

Può essere orientato
 in due modi diversi.

Genera e/o dissipa
 potenza/energia.



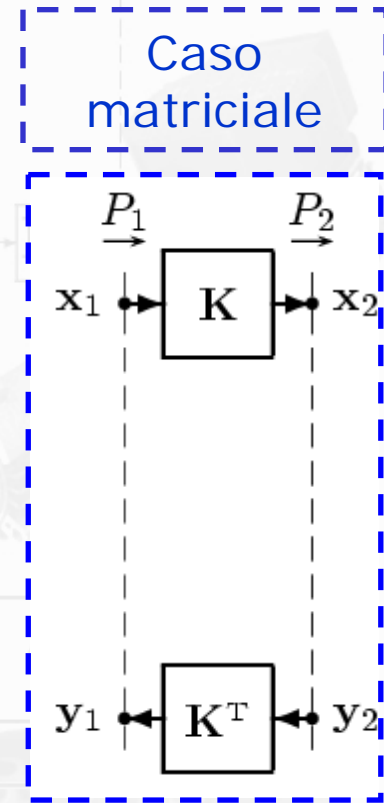
Dissipatore: elemento fisico non orientato

	Elettrico	Mecc. Tras.	Mecc. Rot.	Idraulico
Elemento fisico				

BG e POG: Trasformatori

Blocco di Connessione: converte la potenza senza mai accumulare né dissipare energia.

	1) Trasformatore		2) Giratore	
POG				
BG				



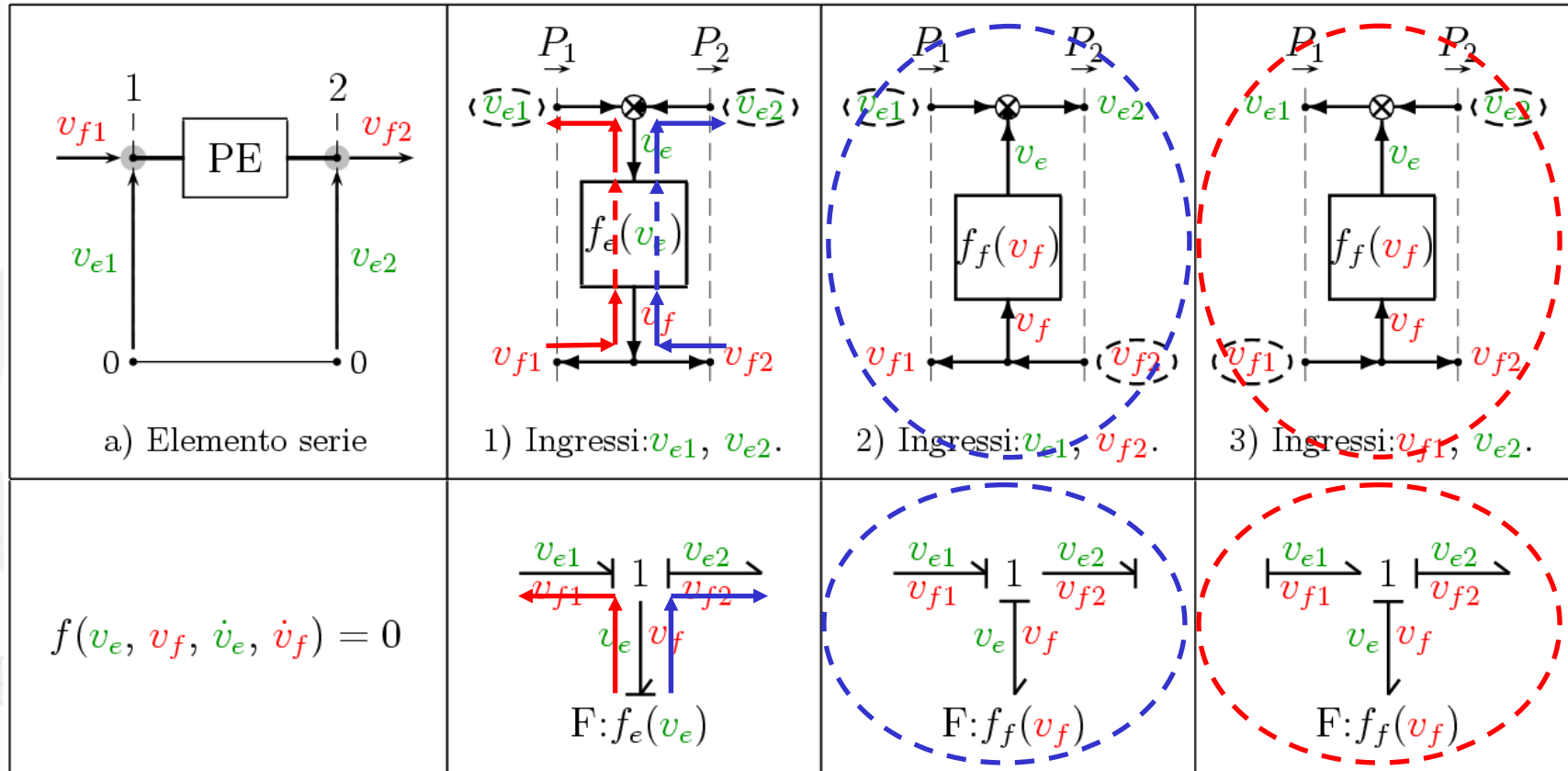
Caso scalare: la tecnica POG usa un unico blocco per rappresentare vari blocchi BG: TR, GY, MTR, MGY.

Caso matriciale: la matrice K può anche essere rettangolare e funzione di parametri esterni: $K=K(z)$.

Nella tecnica BG **non esiste** una rappresentazione grafica di questo elemento

BG e POG: elementi serie

Esiste una **corrispondenza diretta** tra gli schemi POG e le rappresentazioni grafiche BG
 In entrambi i casi il **modello matematico** dell'elemento rappresentato è **ben definito!**



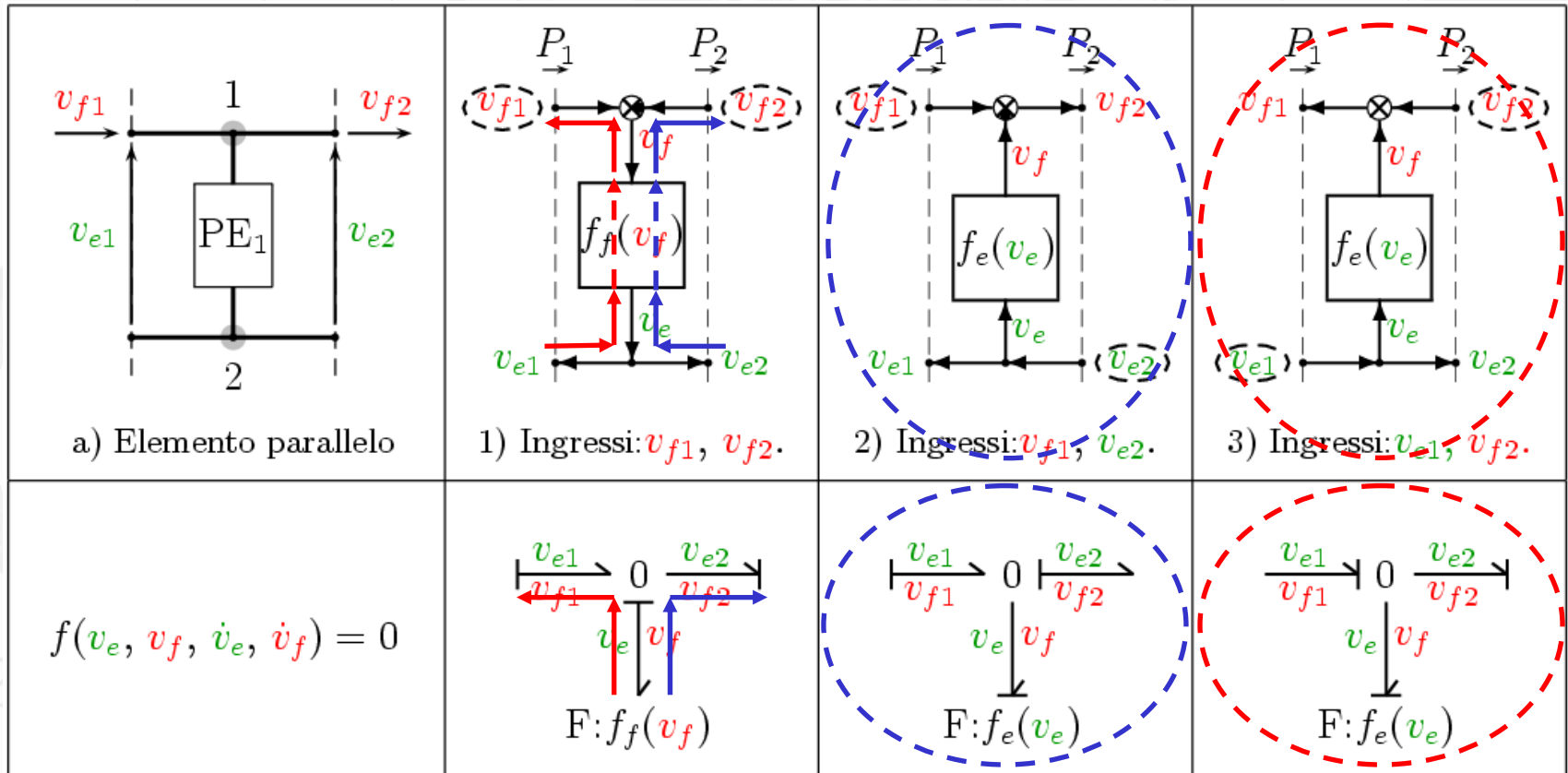
Inversione della sezione di uscita

Inversione della sezione di ingresso

Il Blocco di Elaborazione POG ammette altre due rappresentazioni grafiche equivalenti !

BG e POG: elementi parallelo

Anche per gli elementi in parallelo esiste una corrispondenza diretta tra gli schemi a blocchi POG e le rappresentazioni grafiche BG!



Inversione della sezione di uscita

Inversione della sezione di ingresso

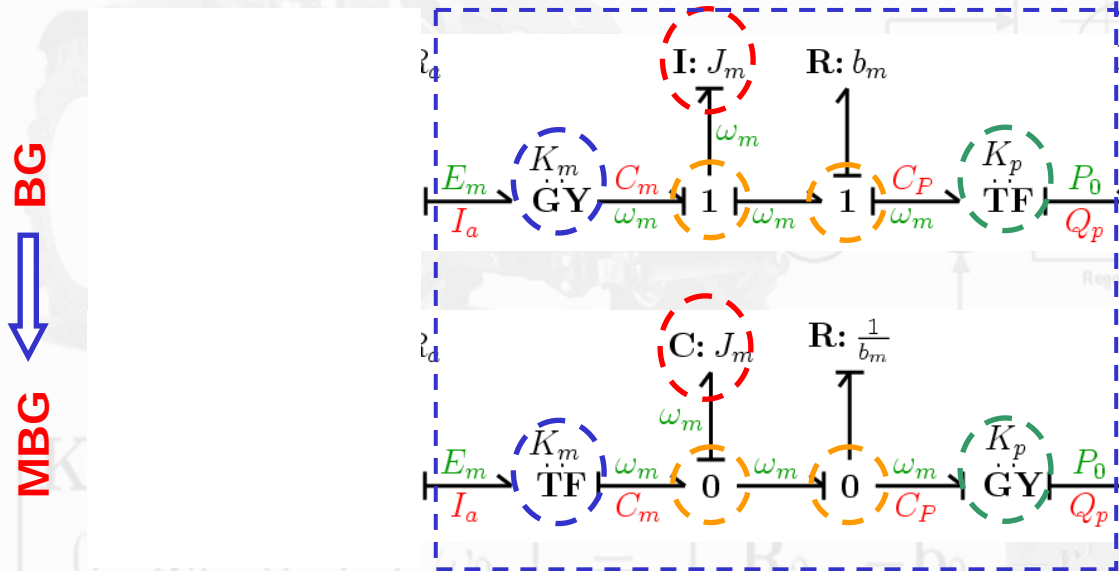
Bond Graphs: variabili effort e flow

I Bond Graphs si basano sulla seguente definizione di effort e flow nei vari Domini Energetici:

BG	Electrical	Mechanical Tras.	Mechanical Rot.	Hydraulic
Effort: e	V Voltage	F Force	τ Torque	P Pressure
Flow: f	I Current	v Velocity	ω Angular velocity	Q Volume flow rate

Tale definizione non coincide con quella delle trans-variabili e per-variabili:

Se si sceglie effort=trans-variabili e flow=per-variabili la rappresentazione grafica **BG** è ancora possibile, ma con una forma leggermente diversa (**MBG**):



Modifiche:

GY -> TF

TR -> GY

I -> C

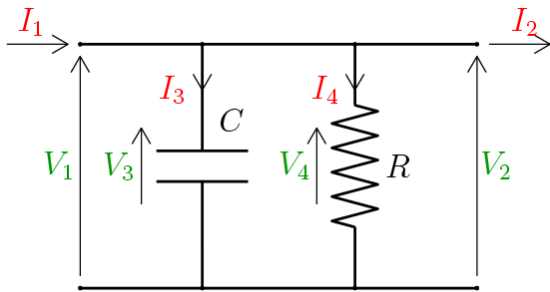
1 -> 0

stroke: |<->|

Nota: il significato dei blocchi **TR**, **GY**, **I**, **C**, **0**, **1** cambia in funzione della scelta iniziale tra variabili effort e variabili flow!

I collegamenti in serie e in parallelo come sono definiti?

Bond Graphs: Serie o Parallelo?



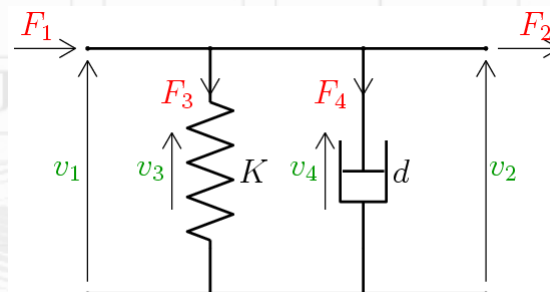
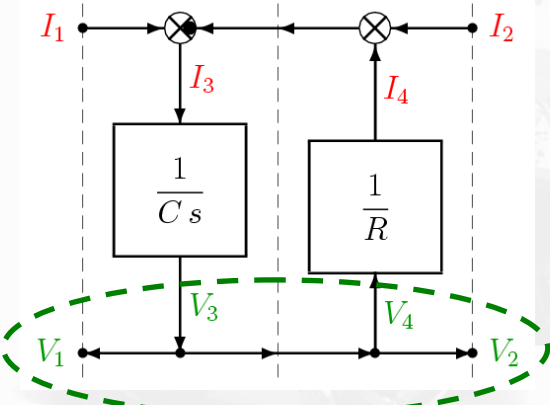
Domanda:

La capacità **C** e la resistenza **R** sono in **Serie** o in **Parallelo**?

Risposta:

POG: sono in **Parallelo** perchè condividono la stessa trans-variabile V_1

BG: sono in **Parallelo** perchè condividono la stessa variabile effort V_1



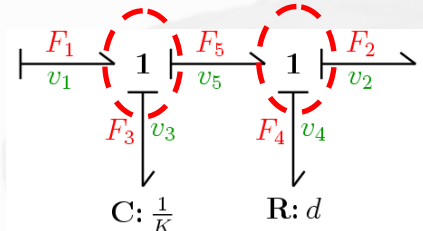
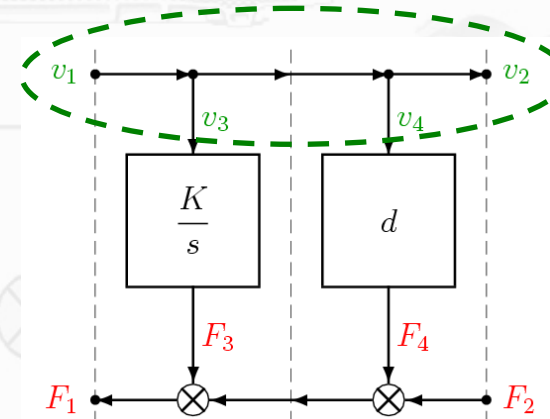
Domanda:

La molla **K** e lo smorzatore **d** sono in **Serie** o in **Parallelo**?

Risposta:

POG: sono in **Parallelo** perchè condividono la stessa trans-variabile v_1

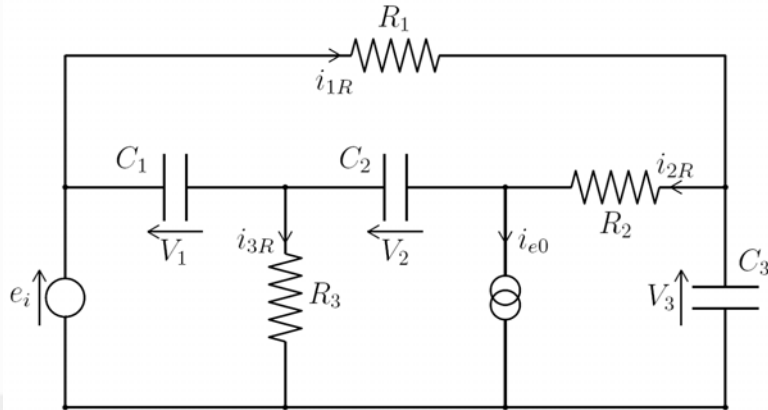
BG: sono in **Serie** perchè condividono la stessa variabile flow v_1



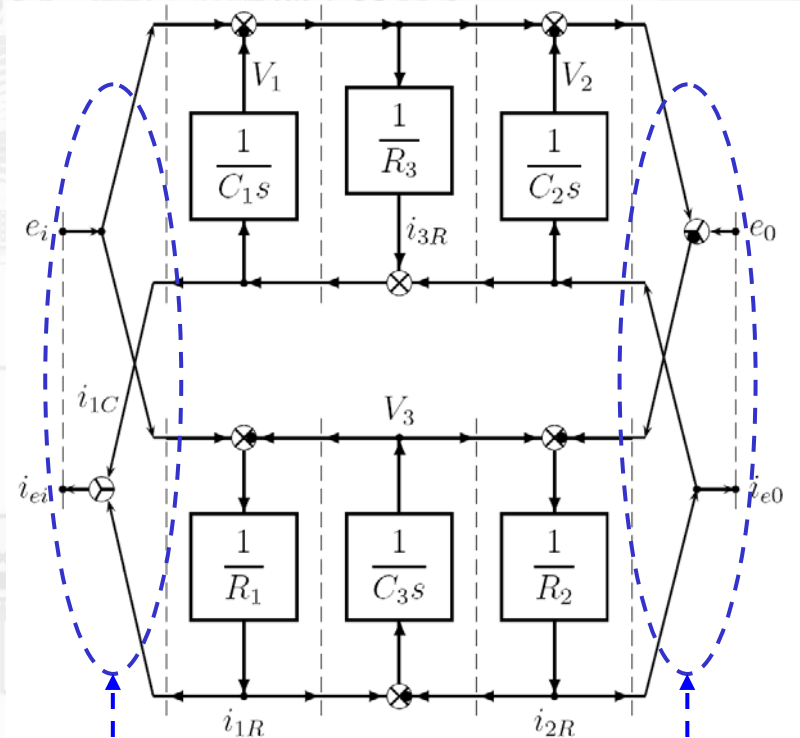
Sarebbero in parallelo se v_1 fosse un effort!

Esempio: Band Stop Filter

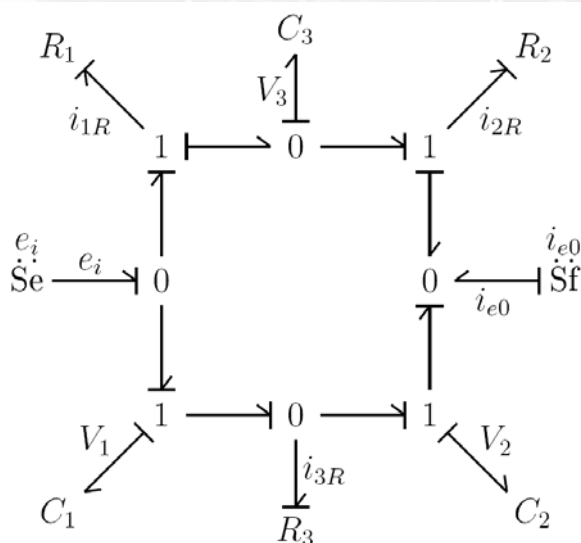
Sistema fisico:



Schema a blocchi POG:



Modello BG:

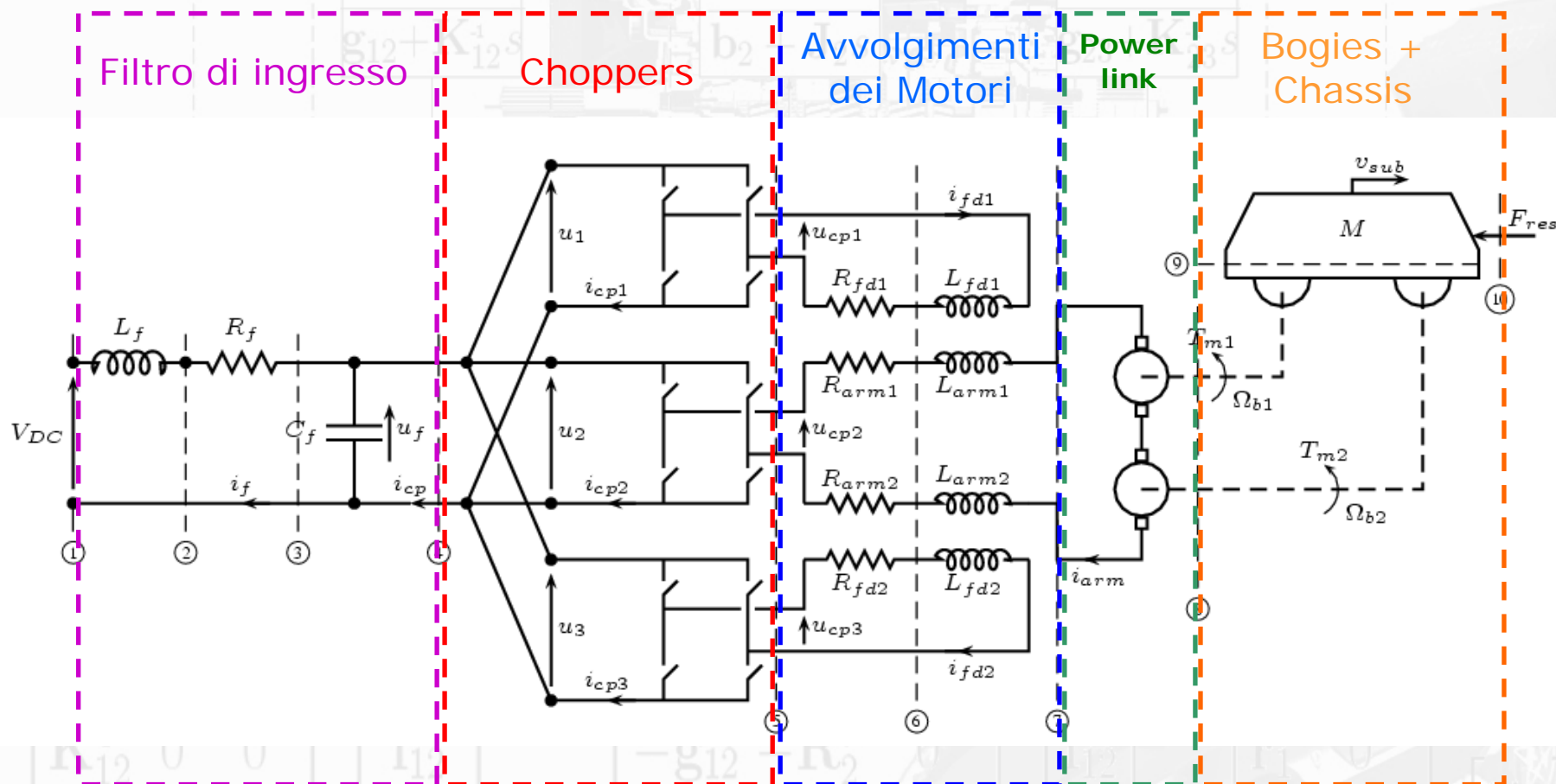


I POG sono più chiari e leggibili!

Elementi di connessione usati raramente

La tecnica BG è più flessibile e sintetica nella rappresentazione grafica “planare” dei sistemi fisici

Sistema Elettrico di Trazione di una Carrozza



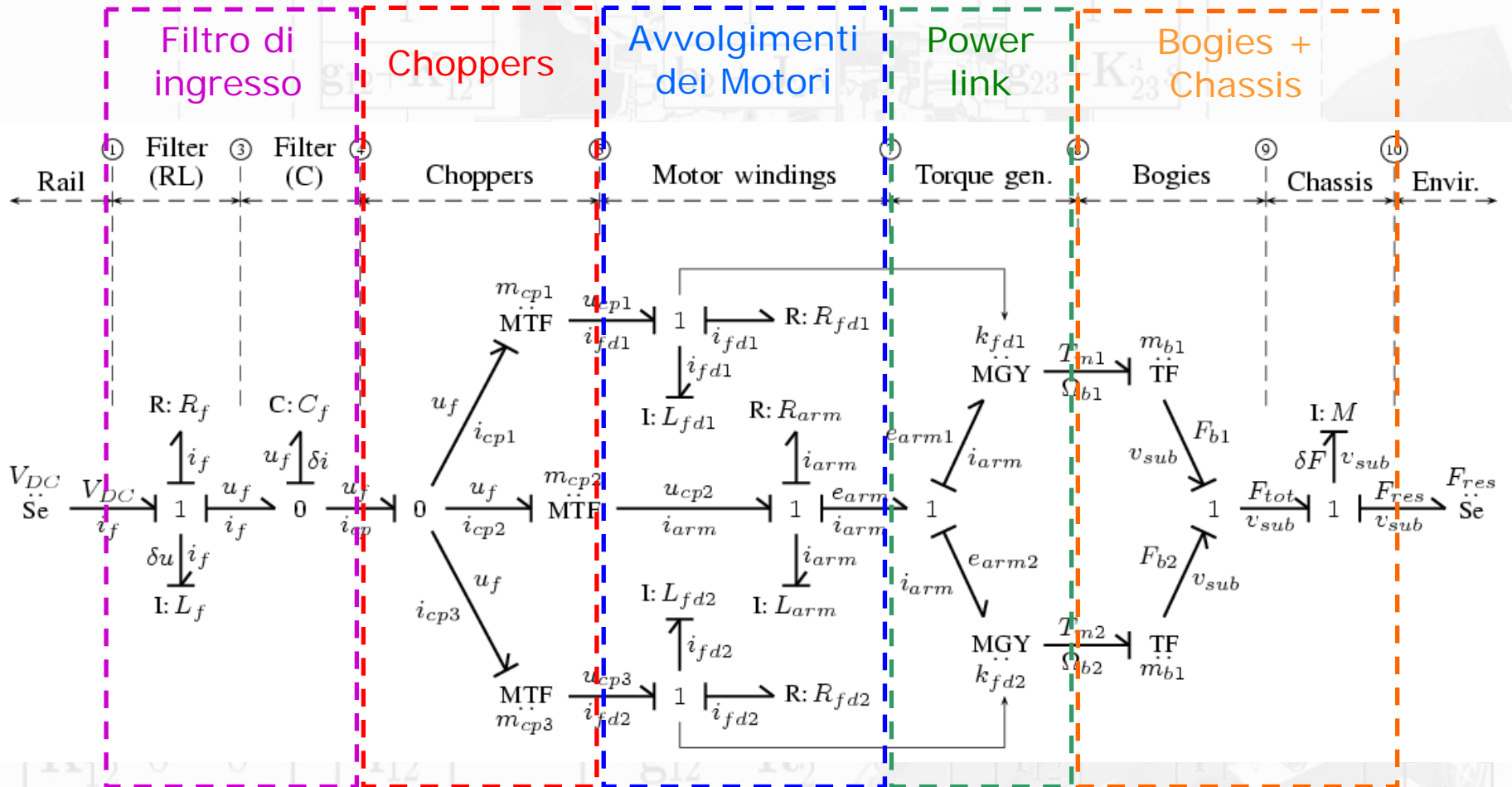
L'energia elettrica viene filtrata e accumulata

Il controllo ridistribuisce l'energia

Due motori elettrici DC con le armature in serie

Forza meccanica che agisce sulla carrozza

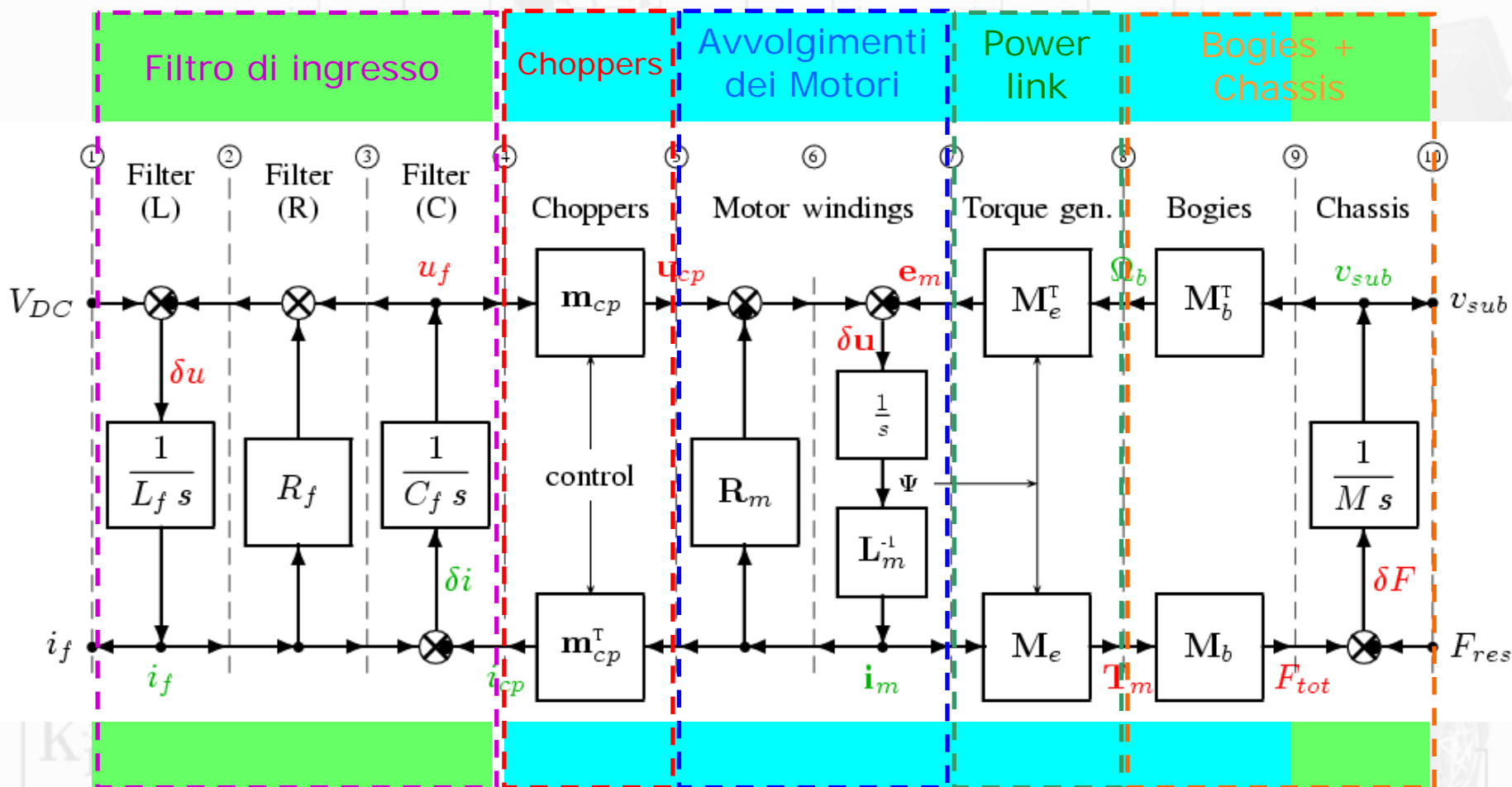
Descrizione **BG** del Sistema di Trazione



- La rappresentazione grafica è planare
- Ogni singolo elemento è mostrato

- Descrizione matematica esatta
- Non facilmente comprensibile per i principianti

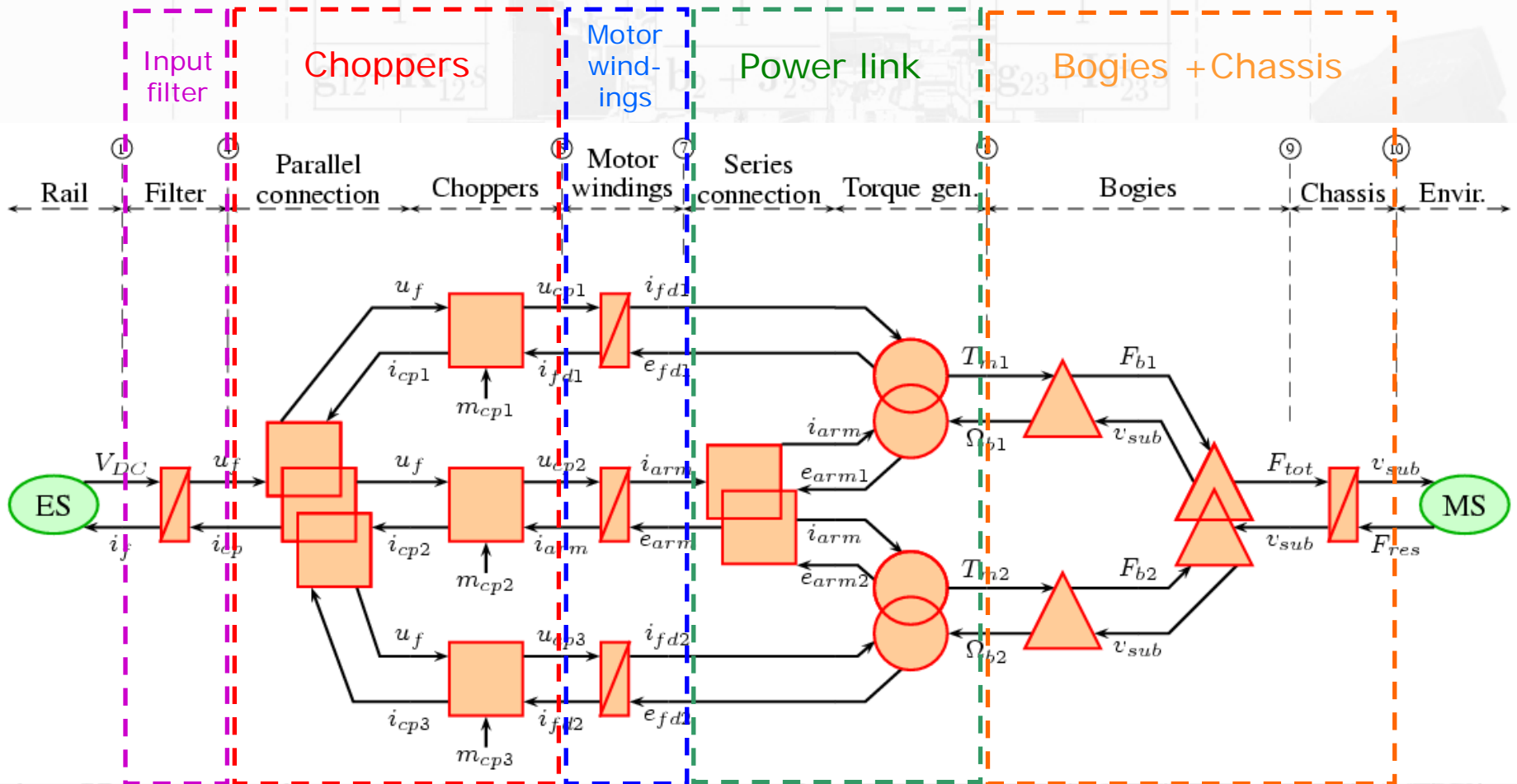
Descrizione **POG** del Sistema di Trazione



- Descrizione matematica esatta
- Facile anche per i principianti

- Sia scalare che vettoriale
- Rappresentazione grafica lineare

Descrizione EMR del Sistema di Trazione



- I collegamenti fisici fra i vari ambiti energetici sono mostrati chiaramente

- La struttura è facile da capire

- Non mostra i dettagli matematici

Confronto POG - BG

	POG	BG
Nome	<i>Power Oriented Graphs</i>	<i>Bond Graphs</i>
Autore - Anno	<i>R. Zanasi – 1991</i>	<i>H. M. Paynter - 1959</i>
Domini energetici	<i>Tutti quelli noti</i>	<i>Tutti quelli noti</i>
Variabili di potenza	<i>Scalari e vettoriali</i>	<i>Scalari</i>
Causalità	<i>Integrale e differenziale</i>	<i>Integrale e differenziale</i>
Nr. elementi base	2	8
Direzione delle variabili	<i>Esplicita e Visibile</i>	<i>Implicita</i>
Direzione della potenza	<i>Implicita</i>	<i>Esplicita e Visibile</i>
Modello matematico dallo schema grafico	<i>Ottenibile direttamente dallo schema a blocchi</i>	<i>Presente implicitamente nella rappresentazione grafica</i>
Simulazione	<i>Diretta in Simulink</i>	<i>Utilizzando programmi specifici</i>
Rappresentazione grafica	<i>Unifilare</i>	<i>Planare</i>
Modello non orientato	<i>Non possibile</i>	<i>Possibile</i>

Conclusioni

1) Bond-Graph (BG)

- E' un tecnica grafica precisa e ormai assestata
- Pregio (Limite): rappresentazione grafica compatta
- Difetto: non adatta per i principianti

2) Power-Oriented Graphs (POG)

- E' basata sugli stessi concetti energetici introdotti dalla tecnica BG
- Pregio: è facilmente comprensibile ed è utilizzabile anche nei corsi base di controllo