



POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Soft-sensor: una tecnologia consolidata applicata alla metrologia e alle reti fluidiche

Original

Soft-sensor: una tecnologia consolidata applicata alla metrologia e alle reti fluidiche / Cosimo Greco; Stefano Malan; Riccardo Tisseur. - ELETTRONICO. - (2014), pp. 1-32. ((Intervento presentato al convegno EcoThermo - Metrologia, Domotica ed Efficienza energetica tenutosi a Torino nel 14/07/2014.

Availability:

This version is available at: 11583/2598389 since:

Publisher:

Published

DOI:

Terms of use:

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)



EcoThermo

METROLOGIA, DOMOTICA ED EFFICIENZA ENERGETICA

**Soft-sensor: una tecnologia consolidata
applicata alla metrologia e alle reti fluidiche**

prof. Cosimo Greco

INRIM, Torino, 14 Luglio 2014

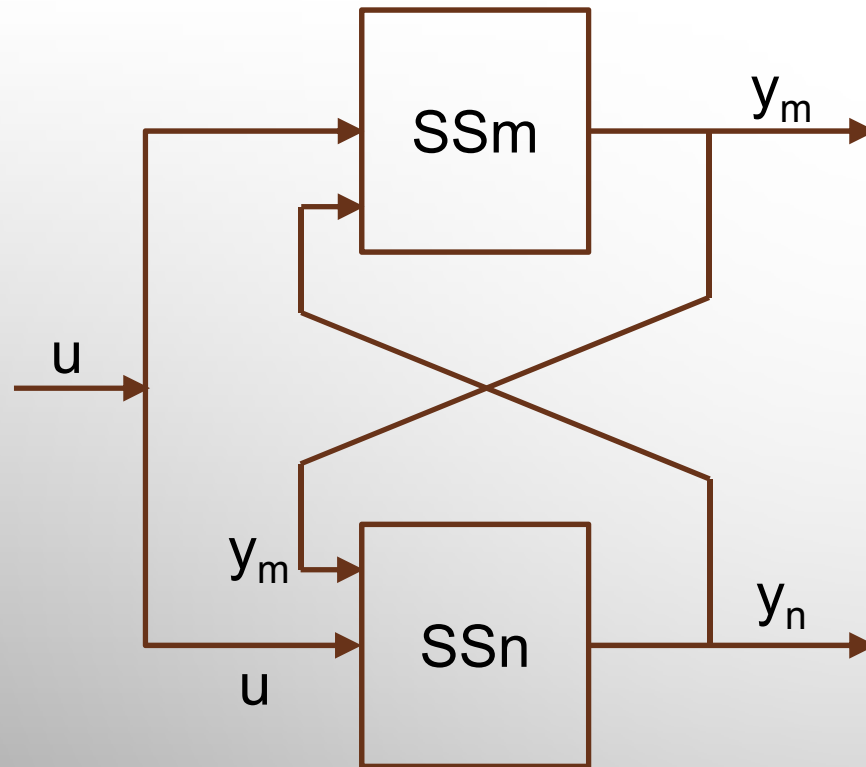


SOFT SENSOR

- *Soft sensor* \equiv *Virtual sensor*
- **Cosa non è: un sensore hardware, un dispositivo fisico**
- **Cosa è: un modello matematico che permette di ricostruire/stimare variabili di interesse non misurabili sulla base di altre variabili misurabili**
- **Il soft sensor è in generale realizzato per via numerica \Rightarrow \Rightarrow sensore software**



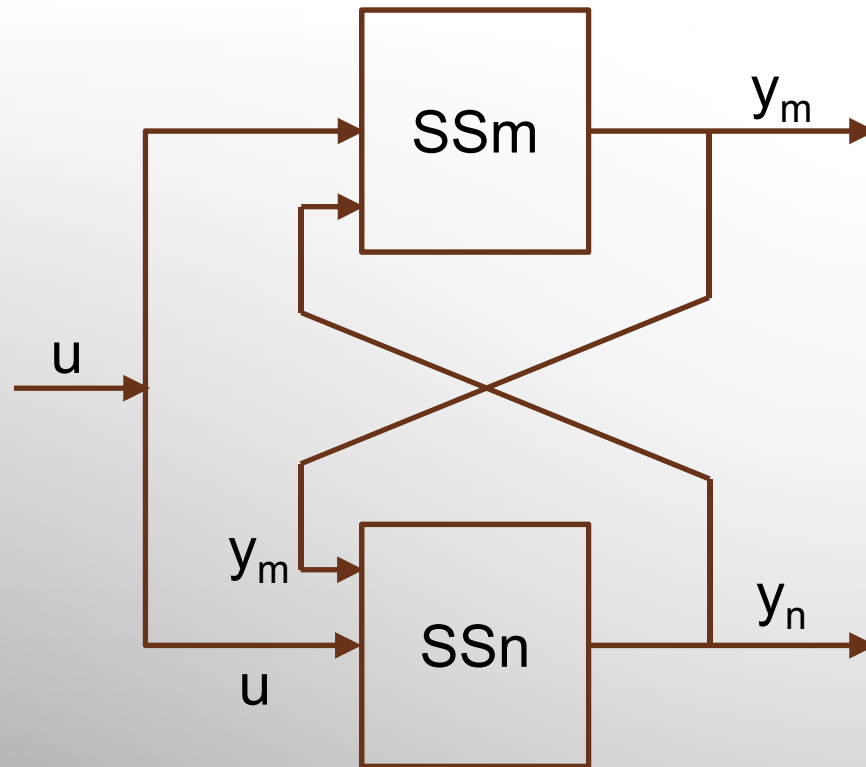
STRUTTURA GENERALE DI UN SISTEMA



- y_m : variabile misurabile
- y_n : variabile non misurabile
- u : comando (dato/misurato)
- SS_m : sottosistema "m"
- SS_n : sottosistema "n"



MODELLISTICA DEL SISTEMA SS_n



- Dalle leggi fisiche che lo governano si determina un modello matematico M_{SS_n} di SS_n



MODELLO M_{SSn} DEL SOTTOSISTEMA SSn



- **ATTENZIONE:** l'uscita di M_{SSn} non è y_n , ma una sua ricostruzione, una sua stima, la ... ***misura virtuale \hat{y}_n di y_n***



SOFT SENSOR TIPO CATENA APERTA

- Il sensore virtuale così concepito è del tipo *in catena aperta* (**struttura adottata nel presente lavoro**)
- NB: y_m e u sono misurabili/dati
- **OBIETTIVO:** $\hat{y}_n \rightarrow y_n$, raggiunto per $M_{SSn} \rightarrow SSn$

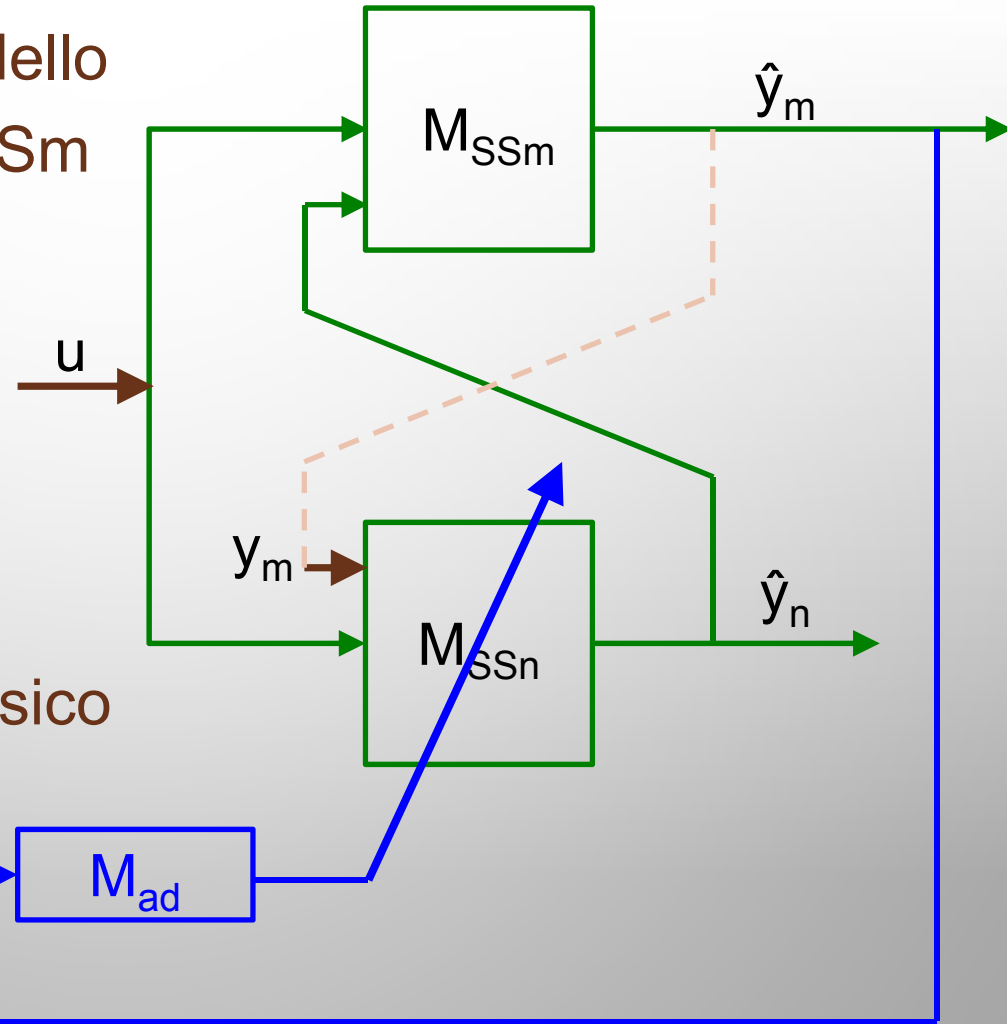


- Alternativa: *architettura in catena chiusa* →



SOFT SENSOR TIPO CATENA CHIUSA

- Necessario anche il modello M_{SSm} del sottosistema SSm

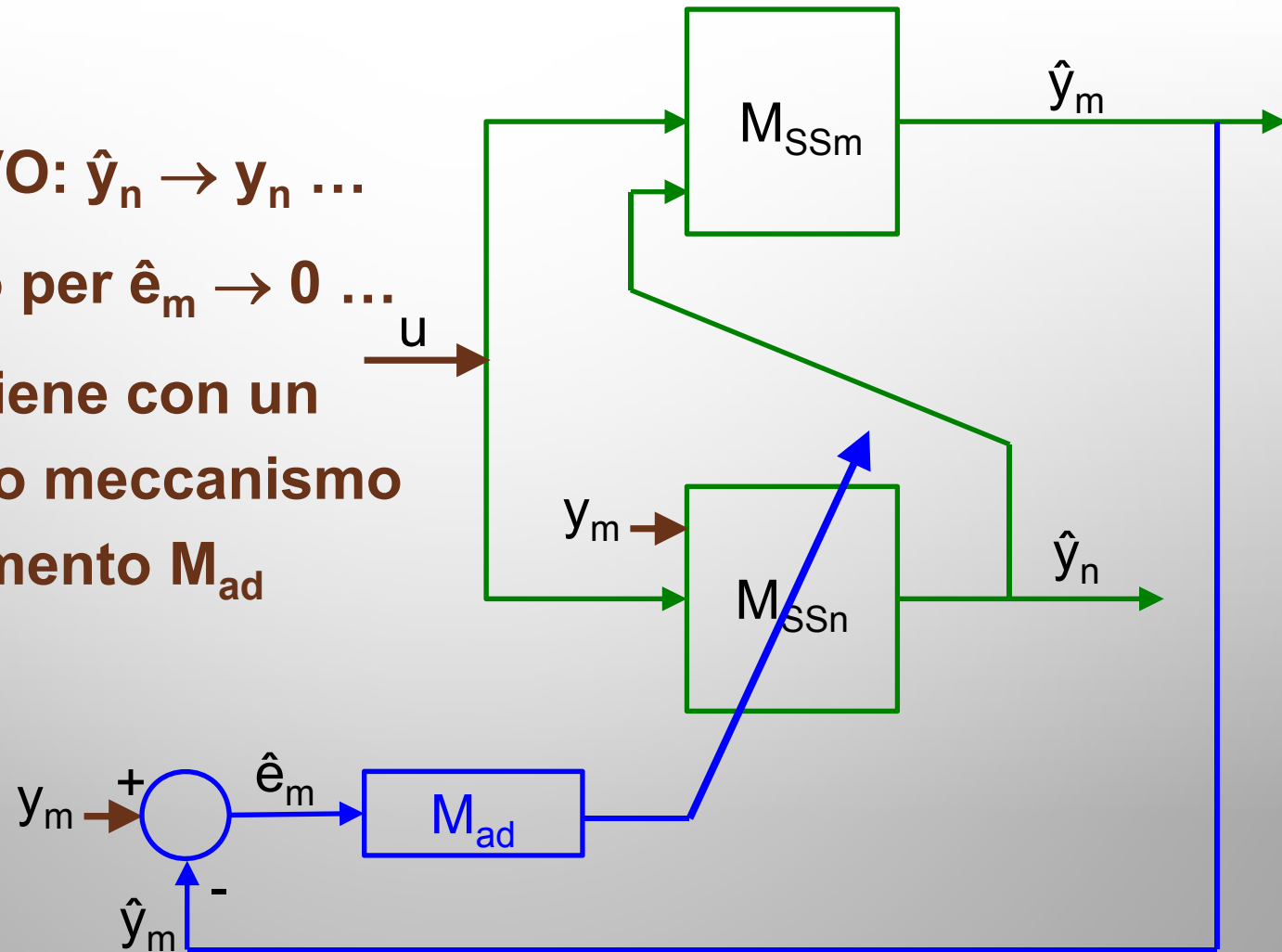


- NB: y_m e u dal sistema fisico



SOFT SENSOR TIPO CATENA CHIUSA

- **OBIETTIVO:** $\hat{y}_n \rightarrow y_n \dots$
- raggiunto per $\hat{e}_m \rightarrow 0 \dots$
- che si ottiene con un opportuno meccanismo di adattamento M_{ad}





OBIETTIVO PRIMARIO: CALCOLO DI "P_T"

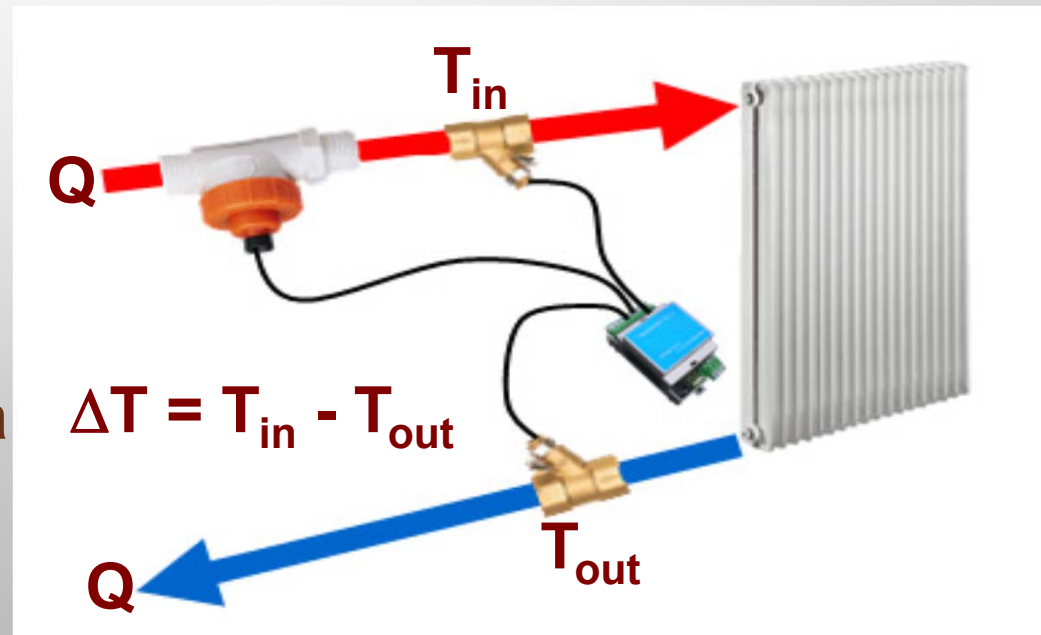
- Obiettivo primario del lavoro presentato è quello della "*microcontabilizzazione*"
- Microcontabilizzazione = calcolo del flusso di calore P_T (potenza termica, in W) trasmesso da un radiatore
- $P_T = c_s \rho \Delta T Q$

c_s: calore specifico

ρ: densità

ΔT: diff. di temperatura

Q: portata

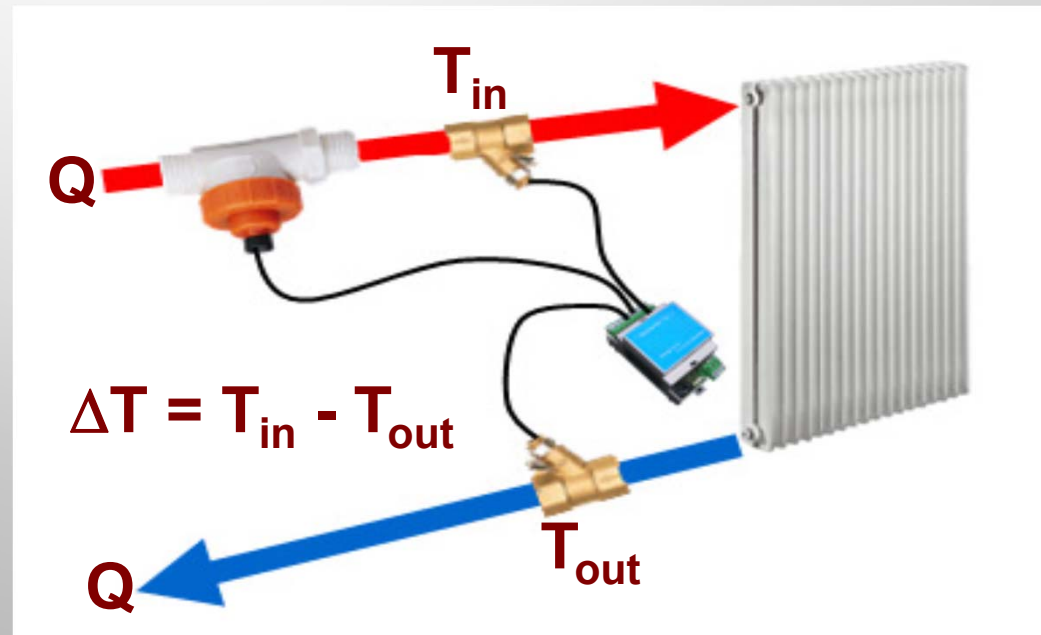




MISURA → CALCOLO DI "Q"

- Le temperature T_{in} e T_{out} sono misurabili mediante sensori precisi ed economici
- La misura della portata Q è invece molto dispendiosa
⇒ Q sarà misurata "virtualmente" mediante *soft sensor*

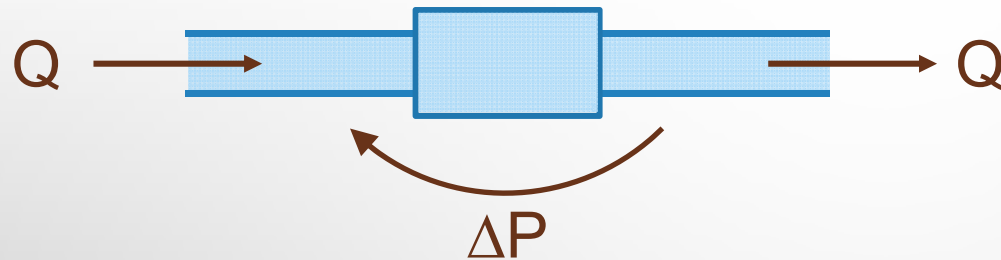
misura virtuale =
= calcolo =
= stima =
= ricostruzione





SOFT SENSOR PER SISTEMA SEMPLICE

Esempio: dispositivo/tratto idraulico passivo



Q: portata

ΔP : salto di pressione

Modello:

$$\Delta P = kQ^n$$

(regime turbolento)

In fase di test anche:

$$\Delta P = kQ^2 \quad \text{e} \quad \Delta P = k_1Q + k_2Q^2$$



SISTEMA SEMPLICE: IDENTIFICAZIONE

Modello:
$$\Delta P = kQ^n$$

- ΔP sempre misurabile
- Q misurata solo in fase di *identificazione*
- **Identificazione: procedura atta a stimare il valore numerico dei parametri "fisici" k ed n**
- Per l'identificazione del modello di questo semplice sistema sono necessarie le misure di ΔP e di Q in due o più diversi punti di lavoro



SISTEMA SEMPLICE: IDENTIFICAZIONE

Modello:
$$\Delta P = kQ^n$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} kQ_1^n \\ kQ_2^n \\ \vdots \\ kQ_m^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{array}{c} \text{procedura numerica} \\ \text{(per es. MQ non-lineari)} \end{array} \rightarrow \hat{k}, \hat{n}$$

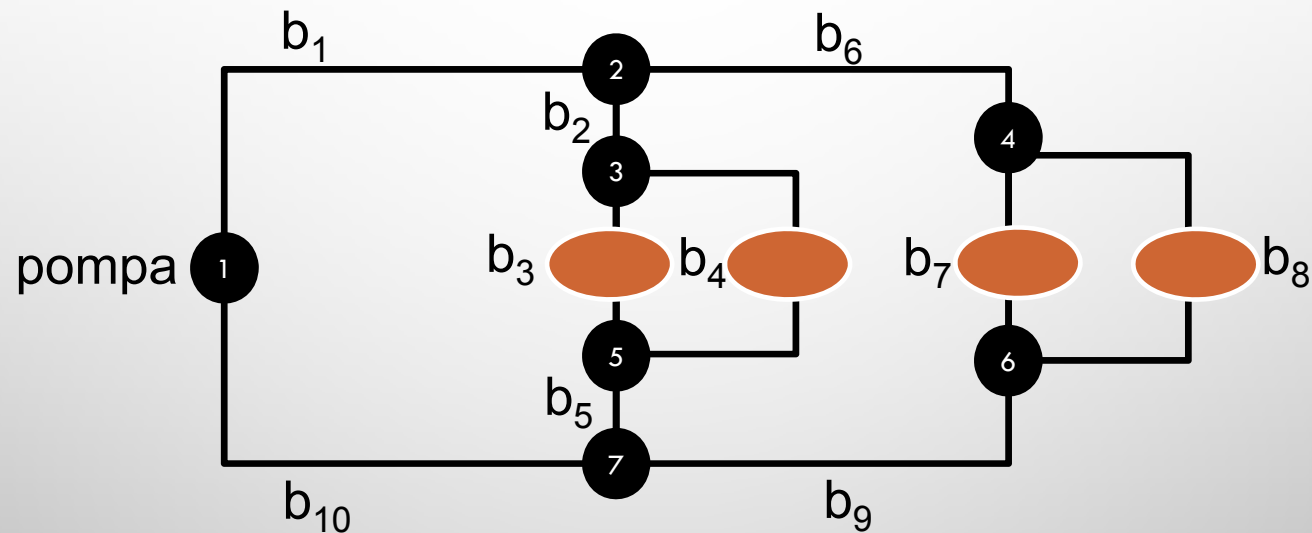
- In questo esempio: calcolati \hat{k} e \hat{n} non sarà più necessario misurare Q , ma solo ΔP da cui:

$$\hat{Q} = \left(\frac{\Delta P}{\hat{k}} \right)^{\frac{1}{\hat{n}}}$$



UN CASO COMPLESSO

- Esempio: impianto con 4 radiatori e 2 colonne
- Ciascun radiatore è dotato di **e_valvola ON/OFF**

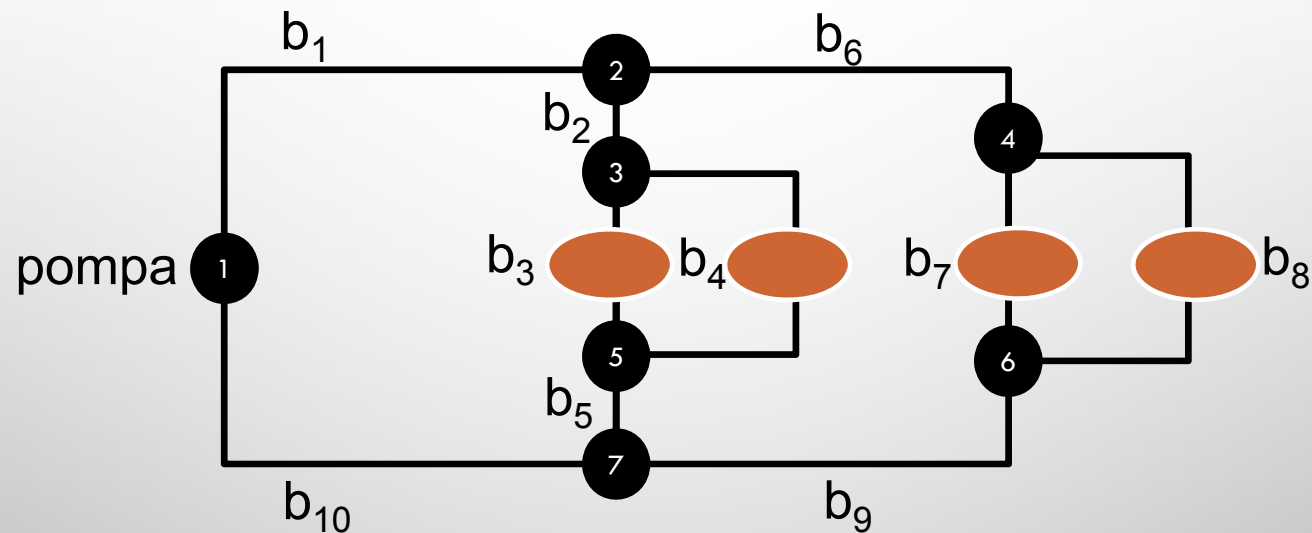


- b_i = ramo (da nodo a nodo)
- ● = nodo (pompa, derivazione)
- ○ = radiatore (compresi valvola e tubatura)
- — = tubatura



UN CASO COMPLESSO

- **Obiettivo:** identificare le coppie $(k_i, n_i) \forall b_i$

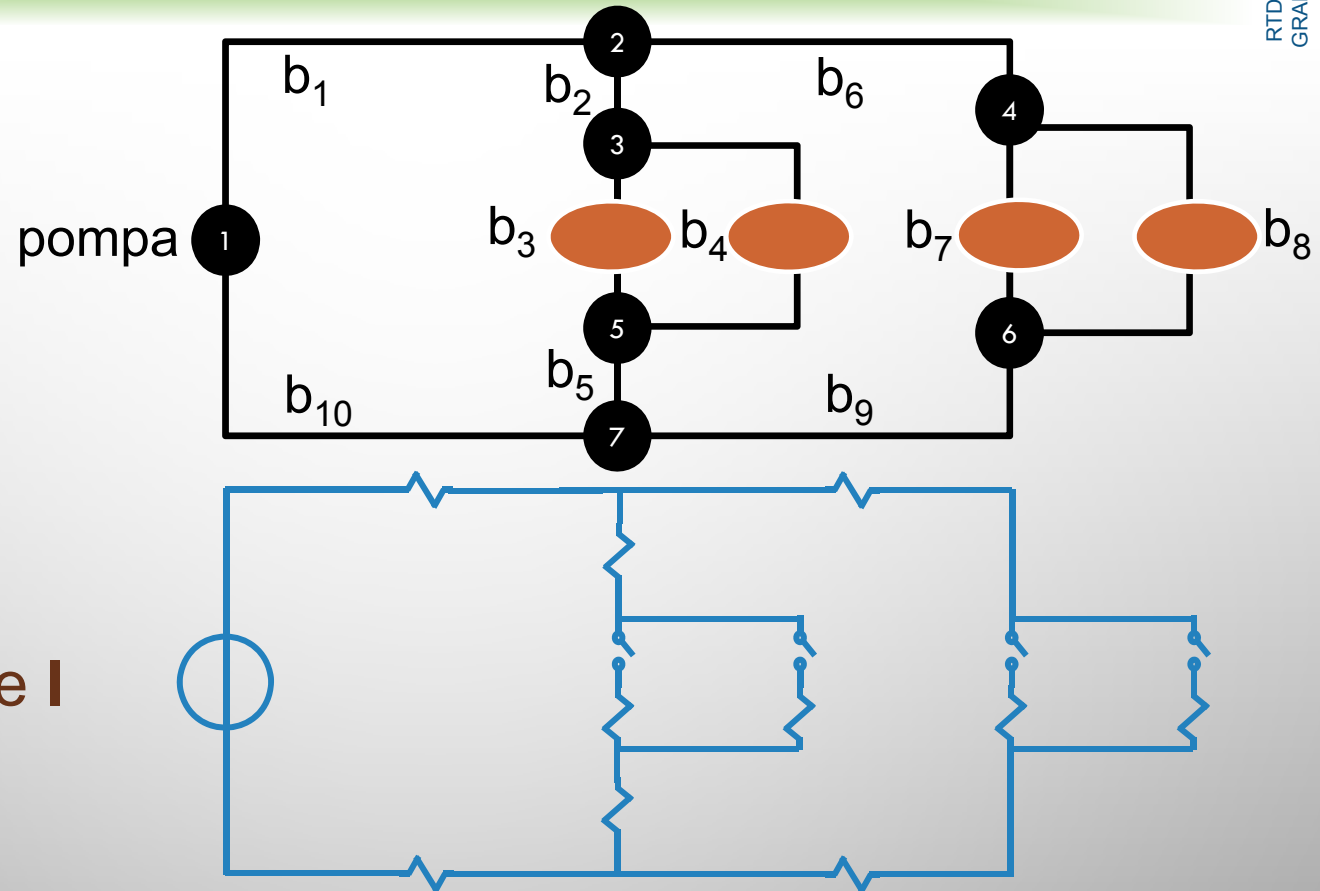


- **Vincolo forte:** misure delle ΔP e delle Q solo sul lato pompa
- **Gradi di libertà:** ON/OFF sulle e_valvole; punto di lavoro della pompa



UN CASO COMPLESSO: ANALOGIA ELT.

RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT



- Misure di V e I solo sul lato generatore
- Resistenze non lineari $\rightarrow V = K I^n$
- Gradi di libertà: ON/OFF sugli switch; punto di lavoro del generatore



SEMPLIFICAZIONE CASO COMPLESSO

$$sb_1 = b_1 \cup b_{10}$$

$$sb_2 = b_3$$

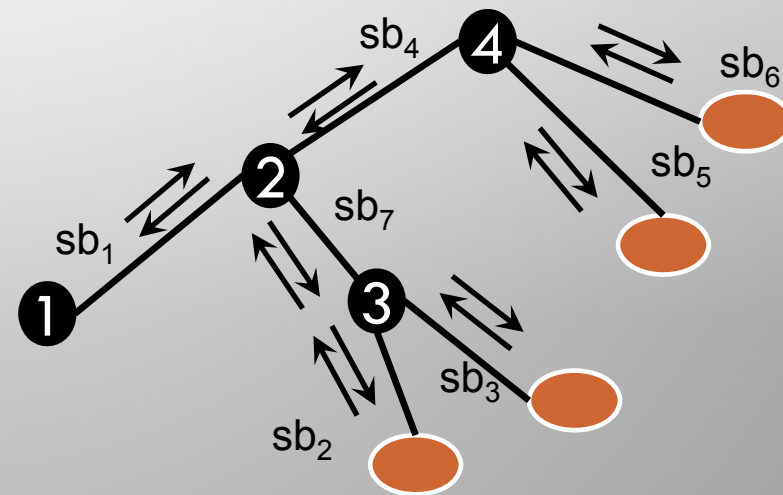
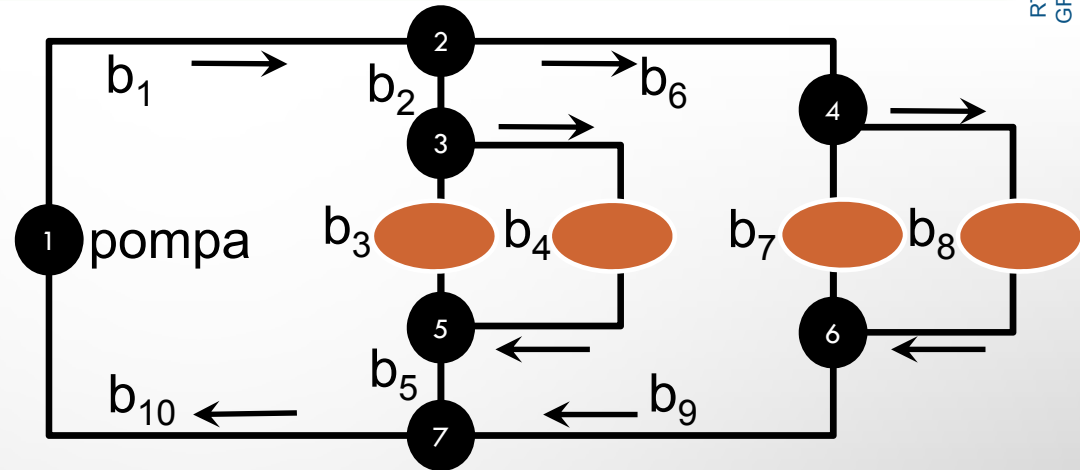
$$sb_3 = b_4$$

$$sb_4 = b_6 \cup b_9$$

$$sb_5 = b_7$$

$$sb_6 = b_8$$

$$sb_7 = b_2 \cup b_5$$





SEMPLIFICAZIONE CASO COMPLESSO

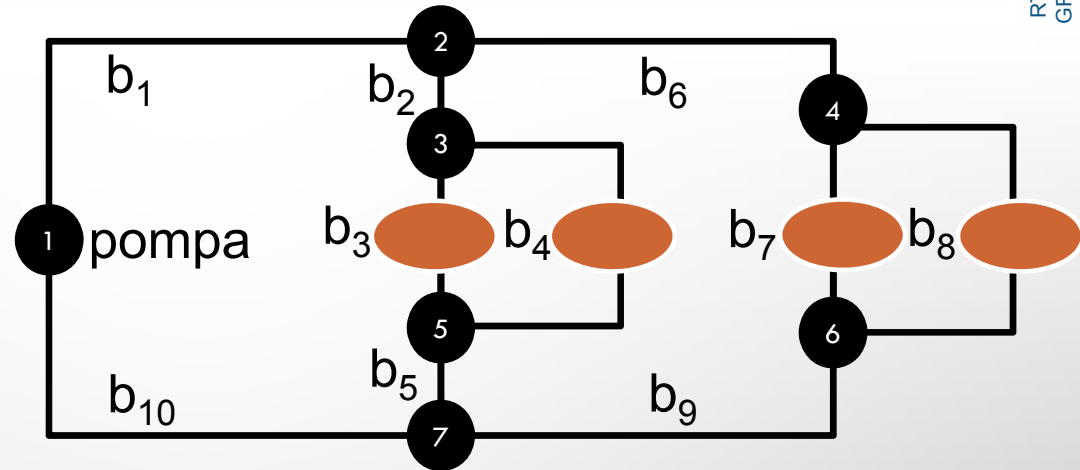
Rappresentazione

"naturale"



10 rami \Rightarrow 20 incognite

(k,n) per ciascun ramo



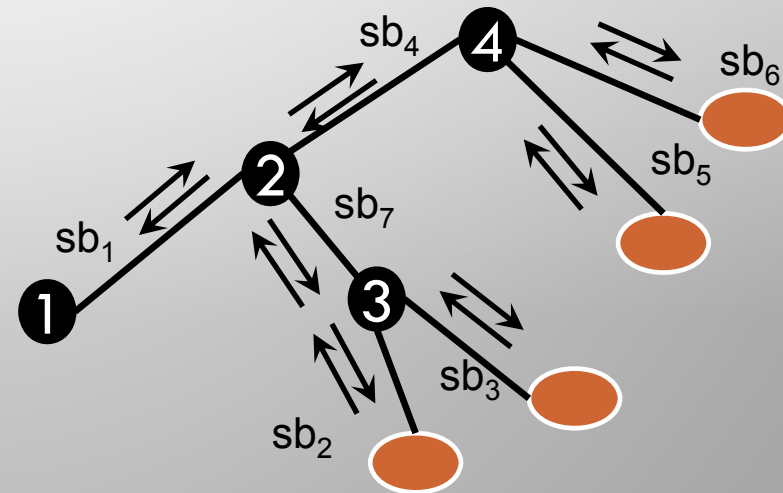
Rappresentazione

"semplificata"



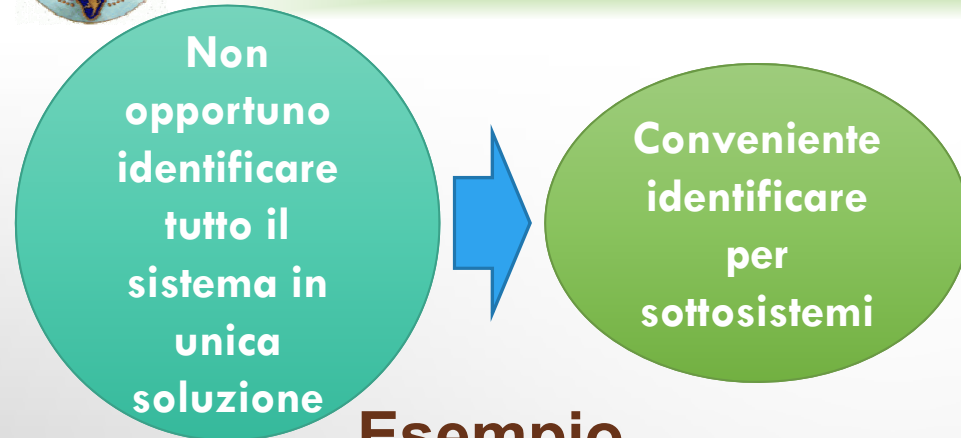
7 rami \Rightarrow 14 incognite

(k,n) per ciascun s-ramo

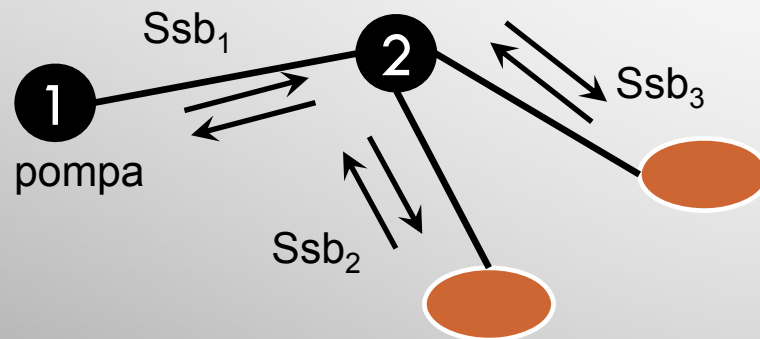




PROCEDURA PER IDENTIFICAZIONE



Esempio



- Misure lato pompa: $\Delta P_{m1,2,3}$; $Q_{m1,2,3}$
- **8 incognite:** $k_{1,2,3}$; $n_{1,2,3}$; $Q_{32,33}$
- **5 equazioni** \Rightarrow **necessario un altro set di misure (\neq setpoint)**

Set di misure sul sottosistema (pompa su un setpoint fisso)

Singole EV aperte

$$\Delta P_{m1} = k_1 Q_{m1}^{n1} + k_2 Q_{m1}^{n2}$$

$$\Delta P_{m2} = k_1 Q_{m2}^{n1} + k_3 Q_{m2}^{n3}$$

Due EV aperte

$$\Delta P_{m3} = k_1 Q_{m3}^{n1} + k_2 Q_{32}^{n2}$$

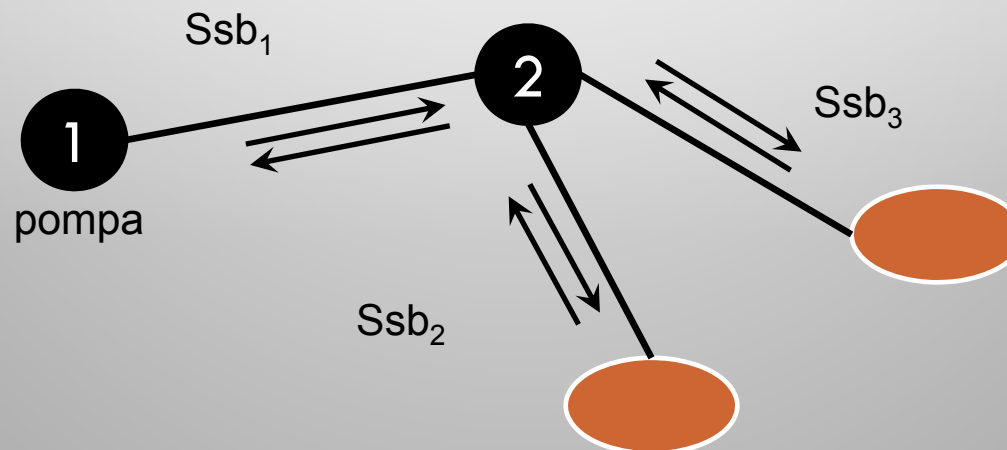
$$k_3 Q_{33}^{n3} = k_2 Q_{32}^{n2}$$

$$Q_{m3} = Q_{32} + Q_{33}$$



NOTA IMPORTANTE

UNA RETE COMUNQUE COMPLESSA PUÒ ESSERE ANALIZZATA CON UNA OPPORTUNA SEQUENZA DI SOTTORETI "BASE" DEL TIPO PROPOSTO NELLA SLIDE PRECEDENTE (È SUFFICIENTE AGIRE SULL'ON/OFF DELLE E_VALVOLE)





IDENTIFICAZIONE SOTTOSISTEMA

➤ Pompa su setpoint fisso (SP_i)

Set di Misure

$$\Delta P_{m1} = k_1 Q_{m1}^{n1} + k_2 Q_{m1}^{n2}$$

$$\Delta P_{m2} = k_1 Q_{m2}^{n1} + k_3 Q_{m2}^{n3}$$

$$\Delta P_{m3} = k_1 Q_{m3}^{n1} + k_2 Q_{32}^{n2}$$

$$k_3 Q_{33}^{n3} = k_2 Q_{32}^{n2}$$

$$Q_{m3} = Q_{32} + Q_{33}$$

Forma implicita

$$\Delta P_{m1} - k_1 Q_{m1}^{n1} + k_2 Q_{m1}^{n2} = 0$$

$$\Delta P_{m2} - k_1 Q_{m2}^{n1} + k_3 Q_{m2}^{n3} = 0$$

$$\Delta P_{m3} - k_1 Q_{m3}^{n1} + k_2 Q_{32}^{n2} = 0$$

$$k_3 Q_{33}^{n3} - k_2 Q_{32}^{n2} = 0$$

$$Q_{m3} - Q_{32} + Q_{33} = 0$$

Forma compatta

$$S_i(\bar{x}) = 0$$

➤ \bar{x} rappresenta il vettore delle incognite



IDENTIFICAZIONE SOTTOSISTEMA

- Necessari più set di misure \Rightarrow **pompa su n setpoint fissi** (punti di lavoro) diversi fra di loro: **SP_1, SP_2, ..., SP_n**

**Funzionale Sottosistema
da minimizzare**

$$F \begin{bmatrix} S_1(\bar{x}) \\ S_2(\bar{x}) \\ \vdots \\ S_n(\bar{x}) \end{bmatrix} = 0$$

Forma Matriciale

$$F(\hat{x}) = R$$

$R = \text{residuo da minimizzare } (\rightarrow 0)$

**Soluzione con
metodo iterativo
Levenberg-
Marquardt**

Soluzioni: $(\hat{k}_i, \hat{n}_i) \forall i$



IDENTIFICAZIONE SOTTOSISTEMA

- **Pompa su n setpoint fissi** (punti di lavoro) diversi fra di loro: **SP_1, SP_2, ..., SP_n**

$$\Delta P_{m1} - k_1 Q_{m1}^{n1} + k_2 Q_{m1}^{n2} = 0$$

$$\Delta P_{m2} - k_1 Q_{m2}^{n1} + k_3 Q_{m2}^{n3} = 0$$

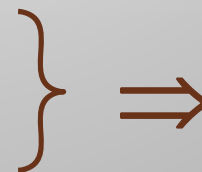
$$\Delta P_{m3} - k_1 Q_{m3}^{n1} + k_2 Q_{32}^{n2} = 0$$

$$k_3 Q_{33}^{n3} - k_2 Q_{32}^{n2} = 0$$

$$Q_{m3} - Q_{32} + Q_{33} = 0$$

$$\Rightarrow S_i(\bar{x}) = 0 \Rightarrow F \begin{bmatrix} S_1(\bar{x}) \\ S_2(\bar{x}) \\ \vdots \\ S_n(\bar{x}) \end{bmatrix} = 0$$

- **numero incognite = 2·3 + 2·n**
- **numero di equazioni = 5·n**



$$n \geq 2$$



IDENTIFICAZIONE DEL SISTEMA

Fase di misura e acquisizione dati:

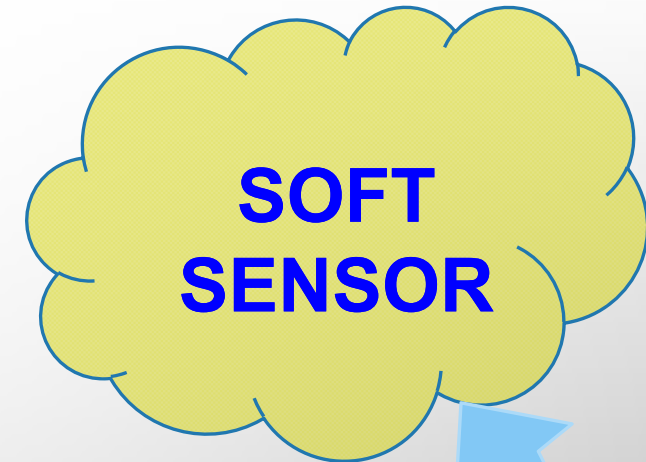
3 set di misura (3 diversi punti di lavoro → $n=3$)

Fase identificazione:

Elaborazione delle misure per stimare i parametri, indi composizione dei sottosistemi

Fase di validazione:

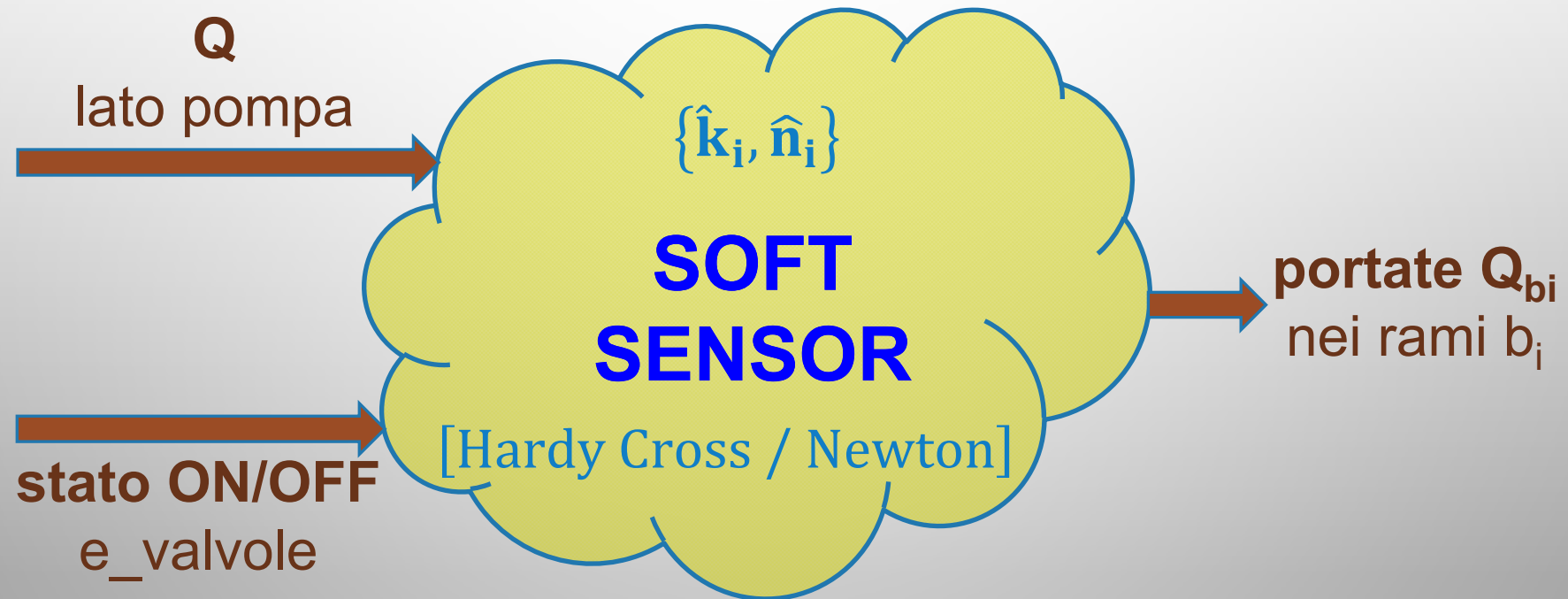
I parametri vengono utilizzati per stimare i flussi; questi sono comparati con quelli misurati



eventualmente



SOFT SENSOR – CONCLUSIONE

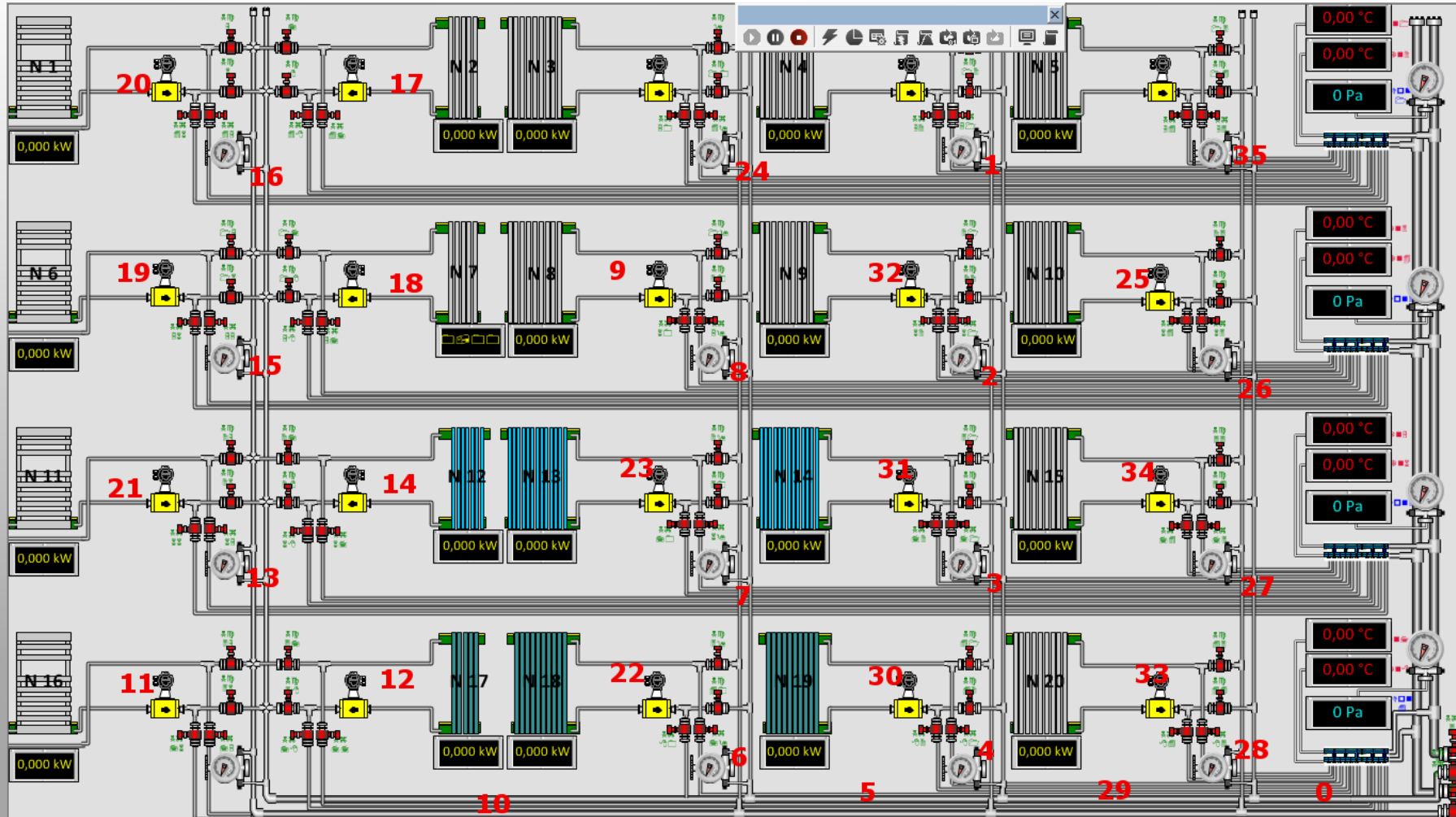




RISULTATI SPERIMENTALI



Schema *Movicon* parete nord





PARETE NORD (a sinistra)

RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT





PARETE NORD (a sinistra)

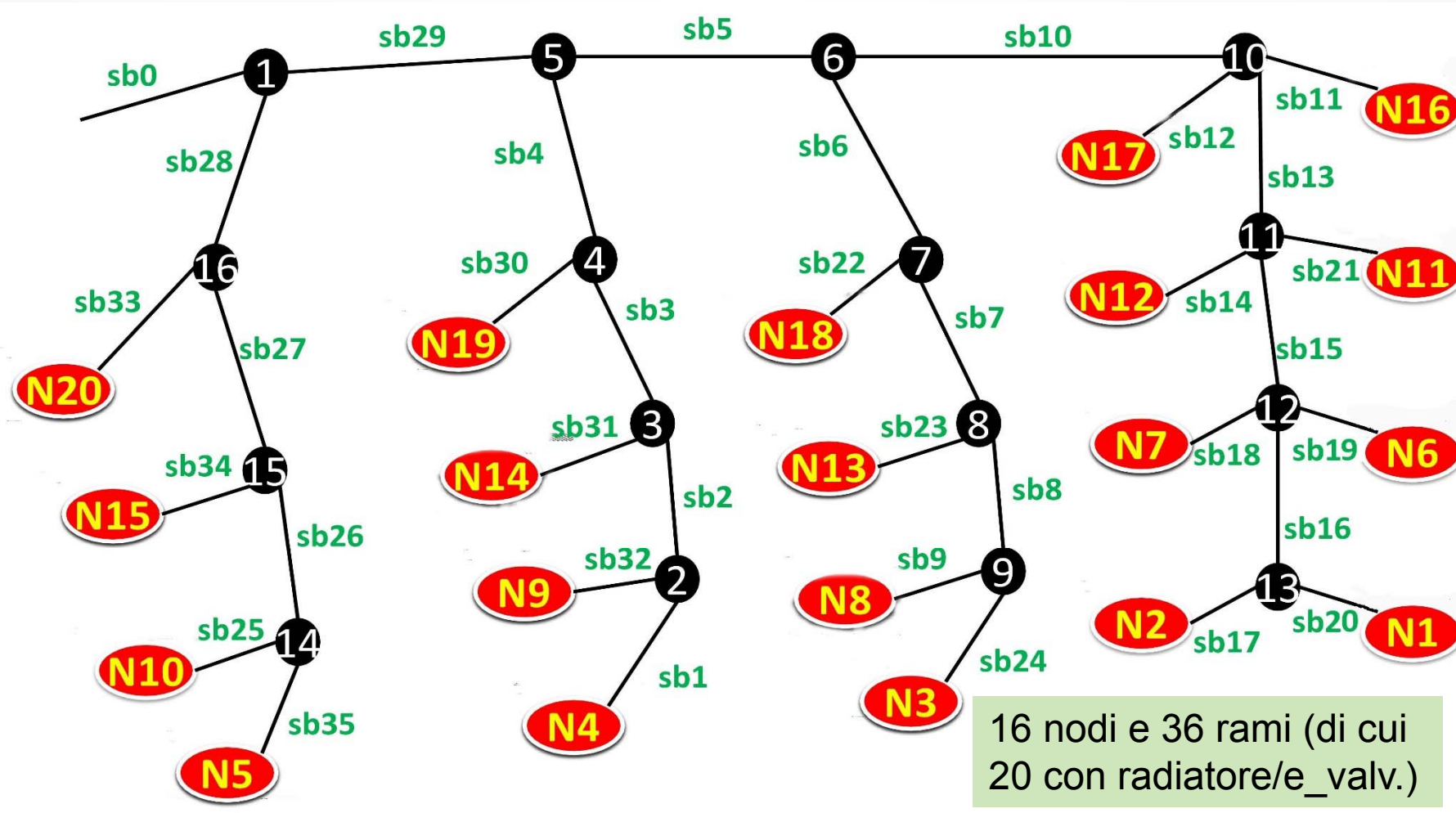
RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT





RISULTATI SPERIMENTALI

Schema *semplificato* parete nord





RISULTATI SPERIMENTALI

36 rami, di cui 20 con radiatore/e_valv. → \hat{k}_i, \hat{n}_i

Symmetric Hydraulic Plant parameters										
SymBr ID	Is EntryExit	IsElectricValve	k^{\wedge}	n^{\wedge}	SymBr ID	Is EntryExit	IsElectricValve	k^{\wedge}	n^{\wedge}	
0	True		0,173293	1,671482	18		True	1,372627872	1,986540784	
1		True	1,99566	1,909738	19		True	2,295881113	1,908826892	
2	True		0,634337	1,738723	20		True	2,308298549	1,924237124	
3	True		0,62123	1,76054	21		True	2,443519746	1,908745564	
4	True		1,043423	1,906007	22		True	1,49504737	1,963638354	
5	True		0,097446	1,212303	23		True	1,66066979	1,94328924	
6	True		1,00072	1,939685	24		True	2,086136585	1,89189789	
7	True		0,678548	1,839006	25		True	1,997181001	1,971435968	
8	True		0,568898	1,651959	26	True		0,52370183	1,86853988	
9		True	1,512582	1,938197	27	True		0,731681034	1,698750081	
10	True		0,654216	1,937617	28	True		1,607855631	1,887638129	
11		True	2,403552	1,939537	29	True		0,005451677	2,841669896	
12		True	1,667919	2,001771	30		True	1,451498159	1,951887343	
13	True		0,229707	1,843325	31		True	1,518062144	1,984655803	
14		True	1,525707	1,9733	32		True	1,502070768	1,951990879	
15	True		0,293422	1,68552	33		True	1,89044853	1,963035087	
16	True		0,371875	1,741378	34		True	2,029666422	1,934583354	
17		True	1,408763	1,972048	35		True	2,232538879	1,907611449	
					36 =	16	+	20		



RISULTATI SPERIMENTALI

ΔP stimate vs ΔP misurate (lato pompa, 22 test)

Test N.	DeltaP MISURATO [Pa]	DeltaP STIMATO [Pa]	DeltaP diff% [Pa]	Portata totale [l/h]	
1	10760,27	10937,36	1,65%	283,68	Errore <= 3%
2	18122,47	18352,65	1,27%	373,15	3% < Errore <= 5%
3	32152,42	32406,26	0,79%	503,90	
4	10107,42	10224,71	1,16%	481,22	
5	30222,80	30820,46	1,98%	857,71	
6	10604,75	10919,59	2,97%	329,95	
7	10874,20	11054,36	1,66%	239,36	
8	18272,57	18562,80	1,59%	315,94	
9	32477,94	32617,91	0,43%	427,23	
10	9000,65	9333,10	3,69%	700,72	
11	15095,12	15433,23	2,24%	921,75	
12	26828,34	27043,79	0,80%	1246,22	
13	41874,64	41910,85	0,09%	1571,98	
14	ND	ND	ND	1898,87	
15	30336,73	30918,17	1,92%	840,06	(slide successiva)
16	26468,46	26612,04	0,54%	1259,96	
17	41462,31	41439,44	0,06%	1592,06	
18	ND	ND	ND	1922,40	
19	8995,23	9287,54	3,25%	697,59	
20	26806,64	26940,74	0,50%	1240,11	
21	9351,49	9538,50	2,00%	626,45	
22	27987,56	28152,70	0,59%	1114,79	



RISULTATI SPERIMENTALI

Q stimate vs Q misurate (2 colonne, 4 piani, 8 radiatori/e_valv.)

PIANO 3														TEST N. 15
N. 1		N. 2		N. 3		N. 4				N. 5				
Stato	Q mis.	Stato	Q mis.	Stato	Q mis.	Stato	Q mis.	Q stim.	Err. %	Stato	Q mis.	Q stim.	Err. %	
Chiuso	0,00	Chiuso	0,00	Chiuso	0,00	Aperta	68,75	66,16	3,76%	Aperta	64,17	62,85	2,07%	Errore <= 3%
PIANO 2														3% < Errore <= 5%
N. 6		N. 7		N. 8		N. 9				N. 10				
Stato	Q mis.	Stato	Q mis.	Stato	Q mis.	Stato	Q mis.	Q stim.	Err. %	Stato	Q mis.	Q stim.	Err. %	
Chiuso	0,00	Chiuso	0,00	Chiuso	0,00	Aperta	78,43	77,22	1,55%	Aperta	67,30	67,51	0,31%	
PIANO 1														
N. 11		N. 12		N. 13		N. 14				N. 15				
Stato	Q mis.	Stato	Q mis.	Stato	Q mis.	Stato	Q mis.	Q stim.	Err. %	Stato	Q mis.	Q stim.	Err. %	
Chiuso	0,00	Chiuso	0,00	Chiuso	0,00	Aperta	115,32	117,58	1,96%	Aperta	94,94	93,43	1,58%	
PIANO 0														
N. 16		N. 17		N. 18		N. 19				N. 20				
Stato	Q mis.	Stato	Q mis.	Stato	Q mis.	Stato	Q mis.	Q stim.	Err. %	Stato	Q mis.	Q stim.	Err. %	
Chiuso	0,00	Chiuso	0,00	Chiuso	0,00	Aperta	193,74	197,07	1,72%	Aperta	157,41	158,25	0,53%	