RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT

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

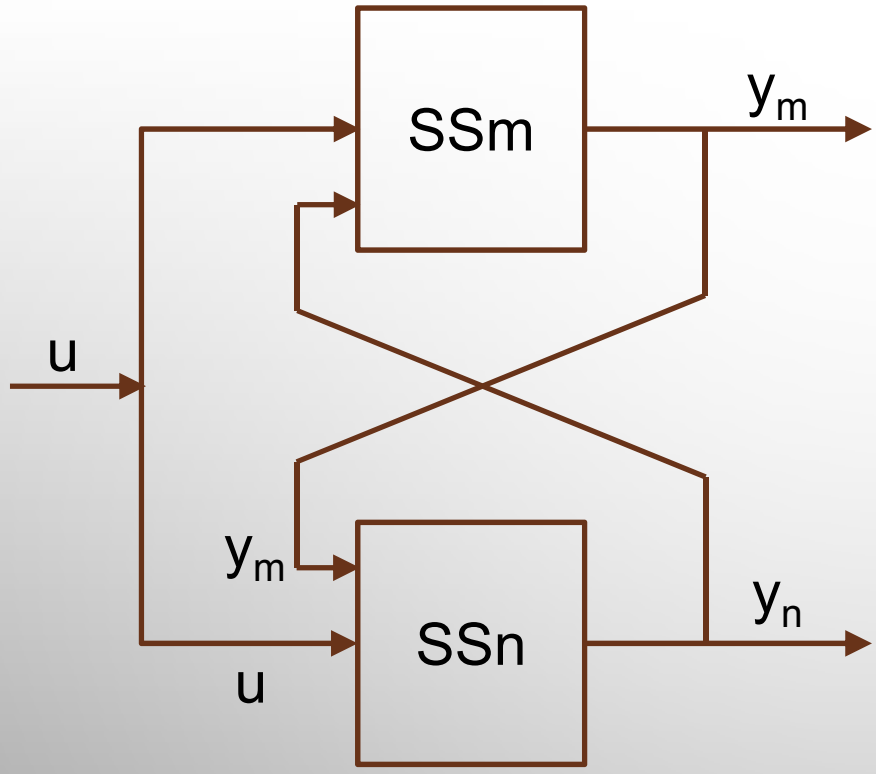
SOFT SENSOR

RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT

- *Soft* sensor ≡ *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 ⇒ ⇒ **sensore software**

STRUTTURA GENERALE DI UN SISTEMA

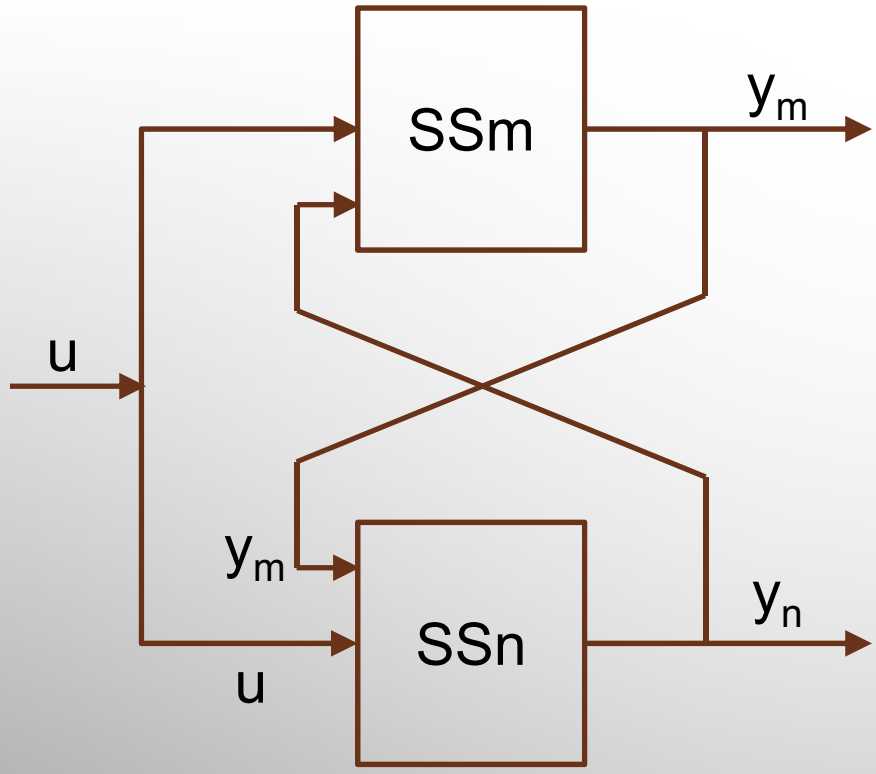
RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT



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

MODELLISTICA DEL SISTEMA SSn

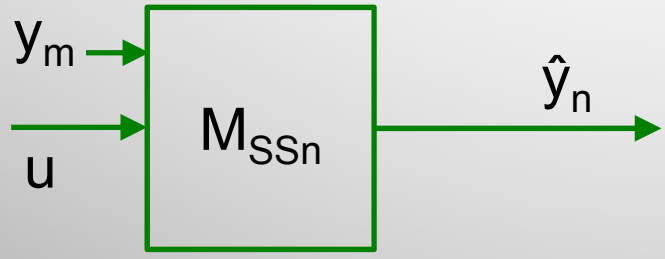
RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT



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

MODELLO M_{SSn} DEL SOTTOSISTEMA SSn

RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT

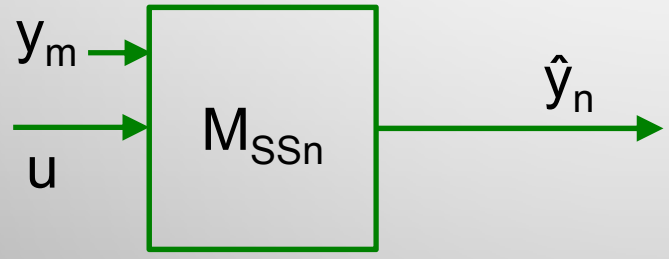


- ATTENZIONE: l'uscita di M_{SSn} non è y_n, ma una sua ricostruzione, una sua stima, la … ***misura virtuale*** $\hat{y}_n$ ***di*** y_n

SOFT SENSOR TIPO *CATENA APERTA*

RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT

- 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**



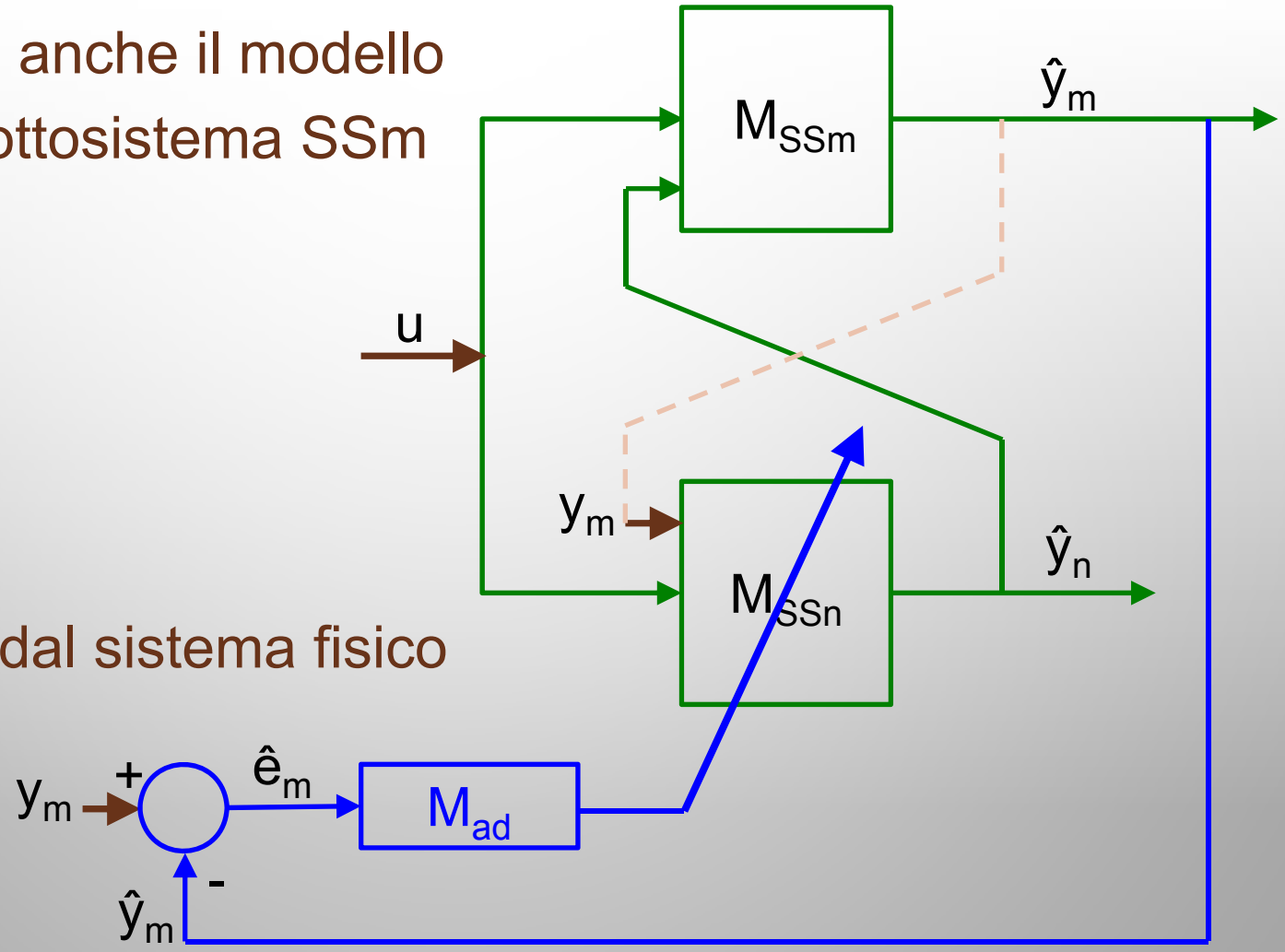
- Alternativa: **architettura *in catena chiusa*** →

SOFT SENSOR TIPO *CATENA CHIUSA*

RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT

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

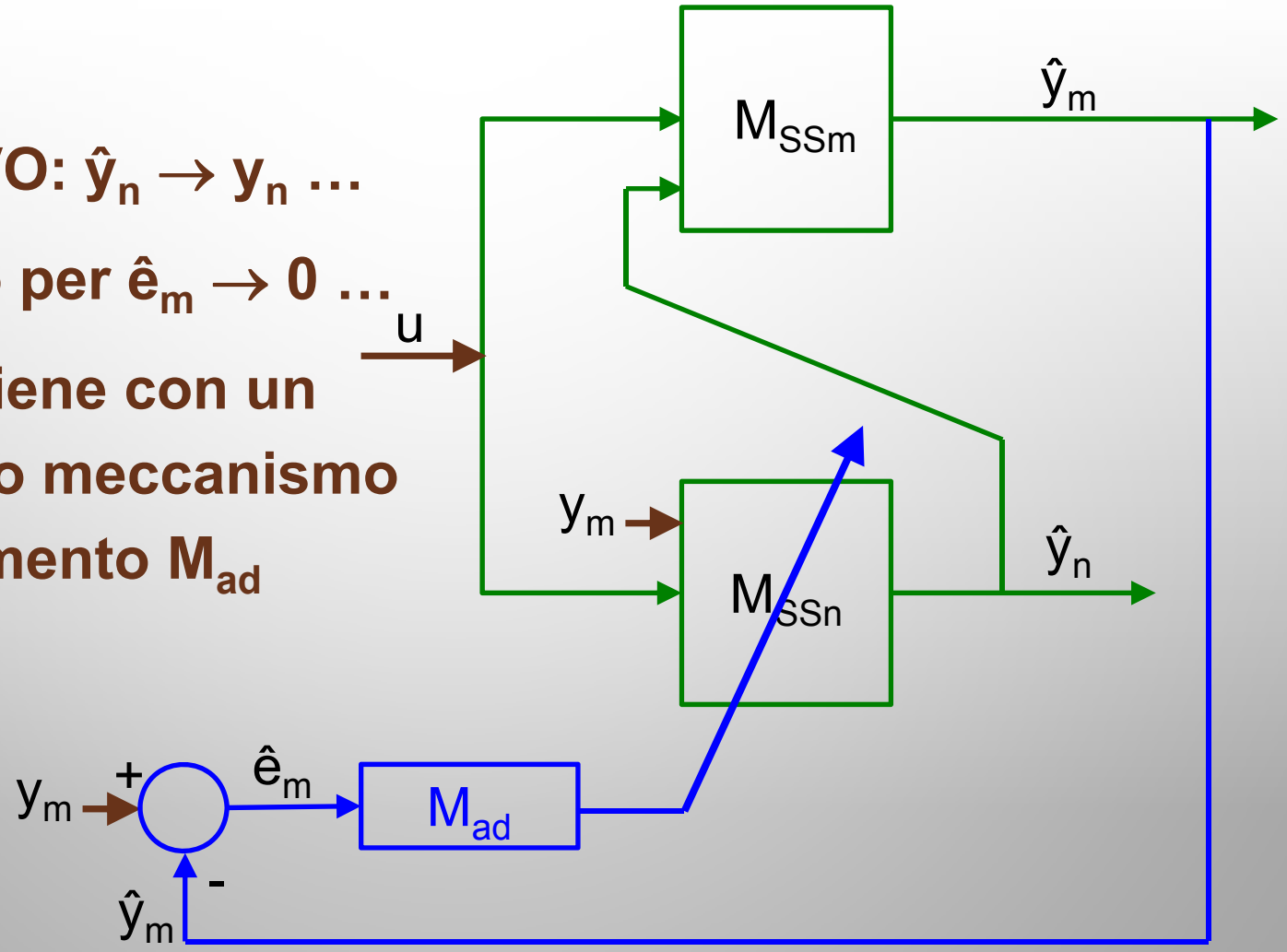
- NB: y_m e u dal sistema fisico



SOFT SENSOR TIPO *CATENA CHIUSA*

RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT

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

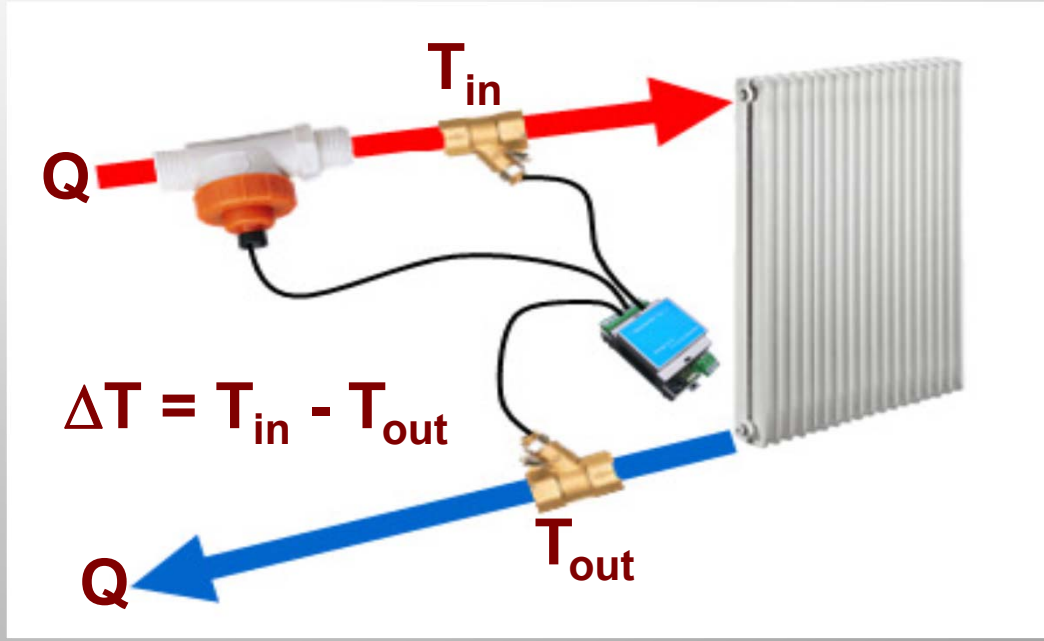


OBIETTIVO PRIMARIO: CALCOLO DI "P_T"

RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT

- 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"

RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT

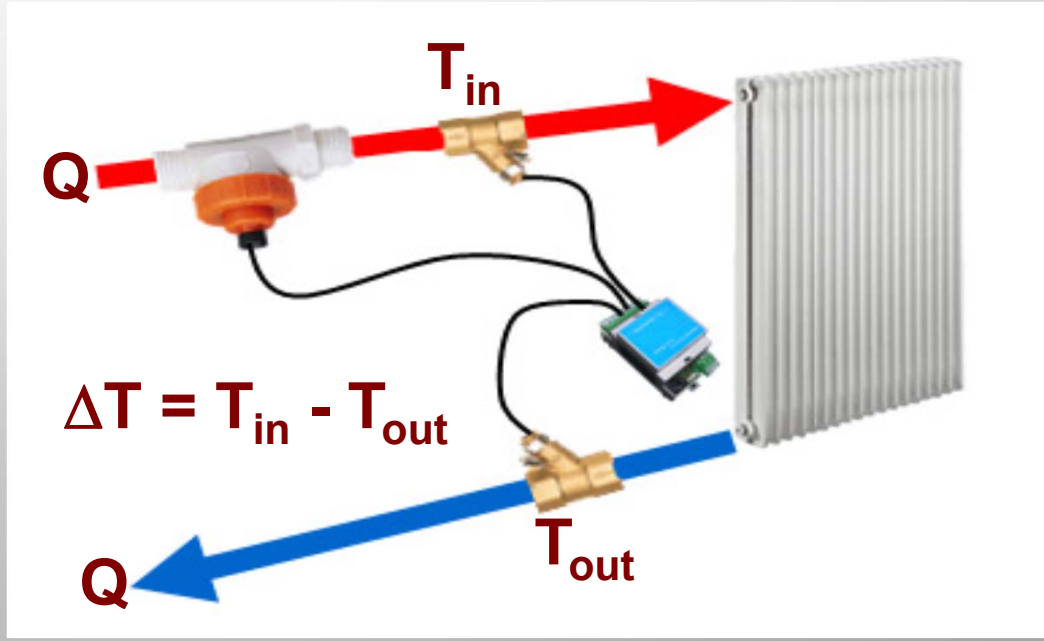
- Le temperature T_{in} e T_{out} sono misurabili mediante sensori precisi ed economici
- **La misura della portata Q è invece molto dispendiosa**
  ⇒ Q sarà misurata "virtualmente" mediante *soft sensor*

misura virtuale =

= calcolo =

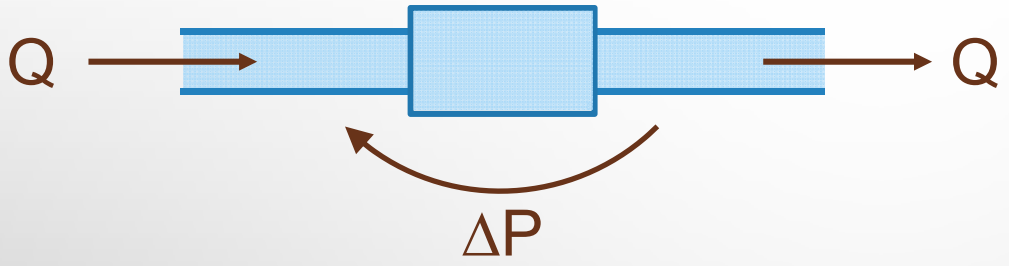
= stima =

= 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:

$$\Delta P = kQ^2 \quad \text{e} \quad \Delta P = k_1 Q + k_2 Q^2$$

SISTEMA SEMPLICE: IDENTIFICAZIONE

RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT

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:

$$\Delta P = kQ^n$$

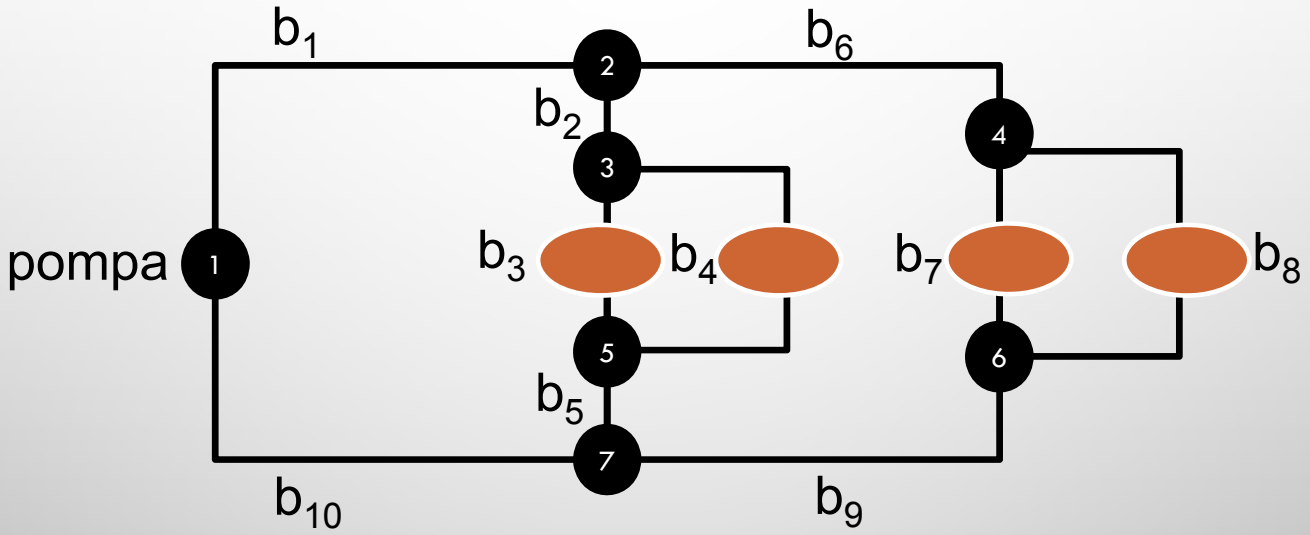
$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} kQ_1^n \\ kQ_2^n \\ \vdots \\ kQ_m^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow \boxed{\text{procedura numerica (per es. MQ non-lineari}} \rightarrow \hat{k}, \hat{n}$$

- 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

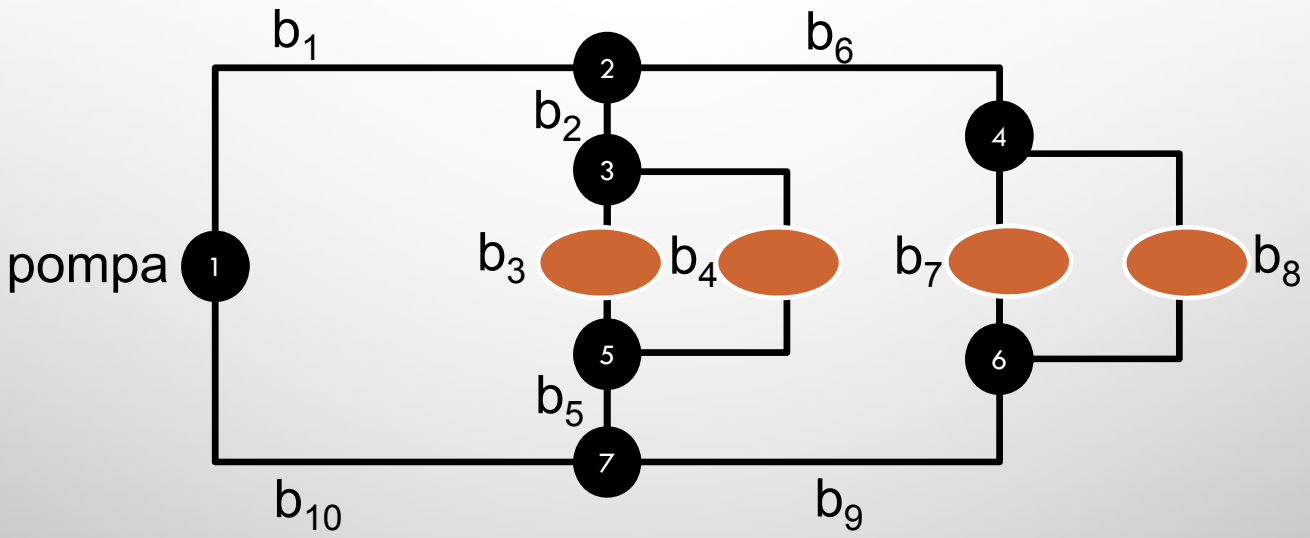
- Esempio: impianto con 4 radiatori e 2 colonne
- Ciascun radiatore è dotato di **e_valvola ON/OFF**



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

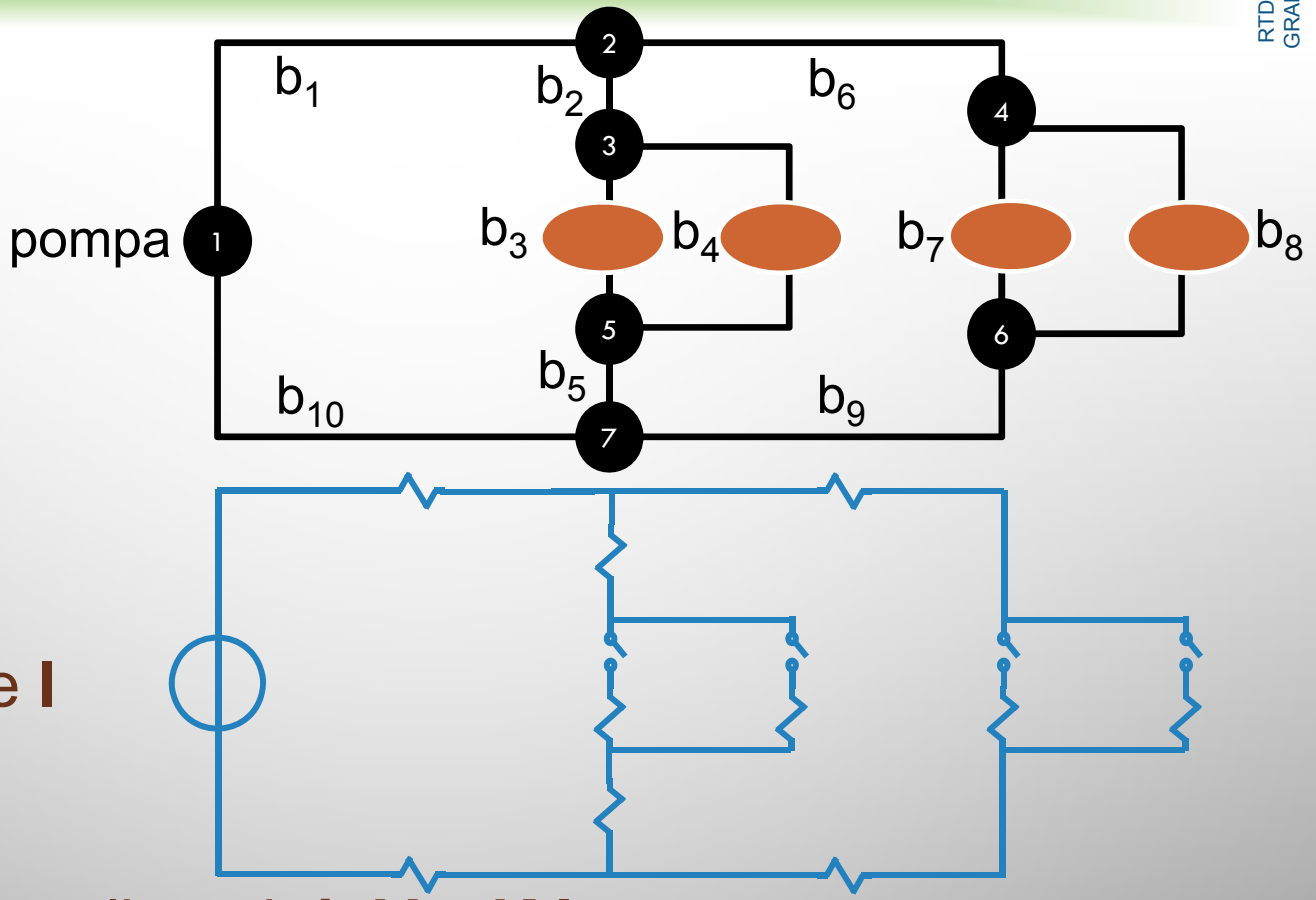
UN CASO COMPLESSO

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



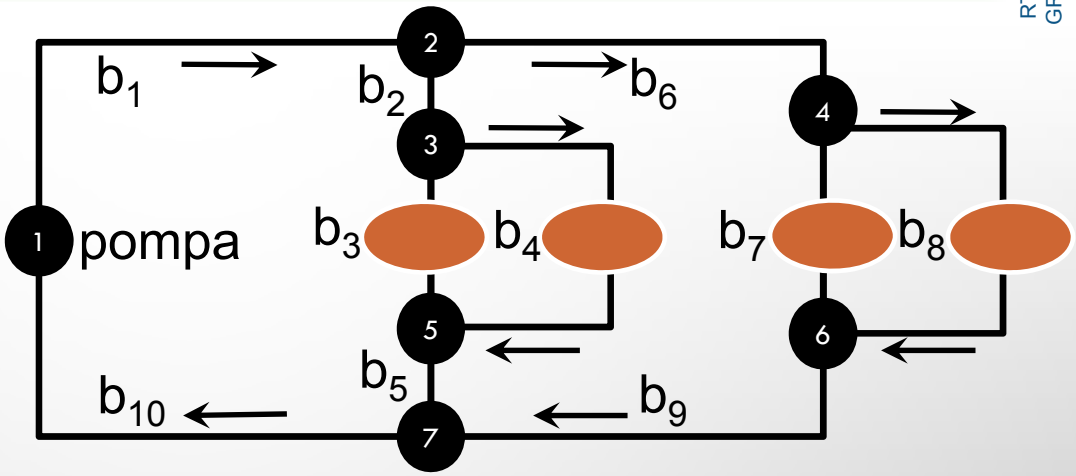
- **Vincolo forte: misure** delle ΔP e delle Q **solo sul lato pompa**
- **Gradi di libertà: ON/OFF** sulle e_valvole; **punto di lavoro** della pompa

UN CASO COMPLESSO: ANALOGIA ELT.

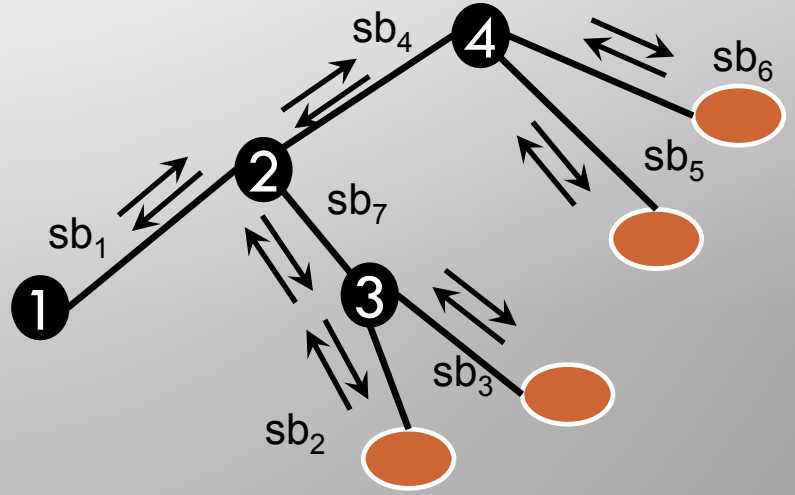


- Misure di **V** e **I** solo sul lato generatore
- Resistenze non lineari → $\mathbf{V = K\ I^n}$
- Gradi di libertà: ON/OFF sugli switch; punto di lavoro del generatore

SEMPLIFICAZIONE CASO COMPLESSO



$$sb_1 = b_1 \cup b_{10}$$
$$sb_2 = b_3$$
$$sb_3 = b_4$$
$$sb_4 = b_6 \cup b_9$$
$$sb_5 = b_7$$
$$sb_6 = b_8$$
$$sb_7 = b_2 \cup b_5$$



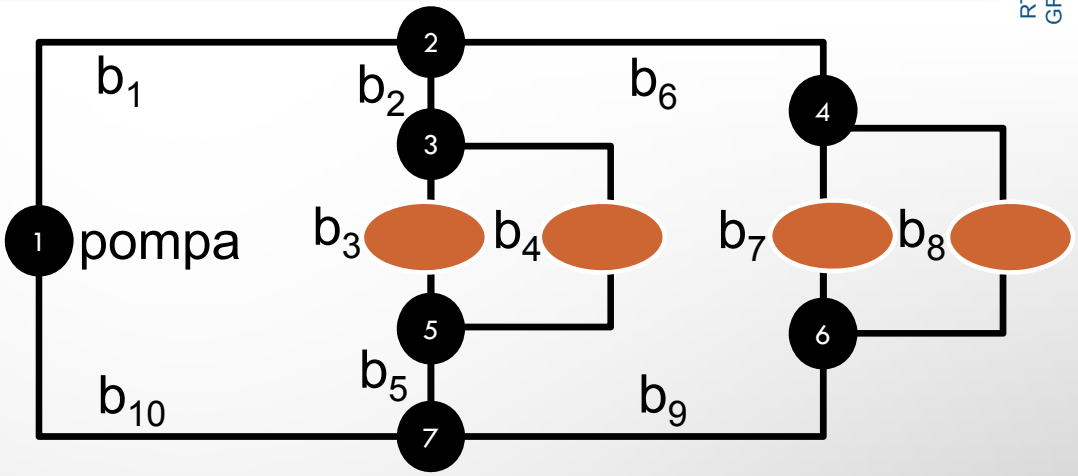
SEMPLIFICAZIONE CASO COMPLESSO

RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT

Rappresentazione "naturale"

10 rami ⇒ 20 incognite

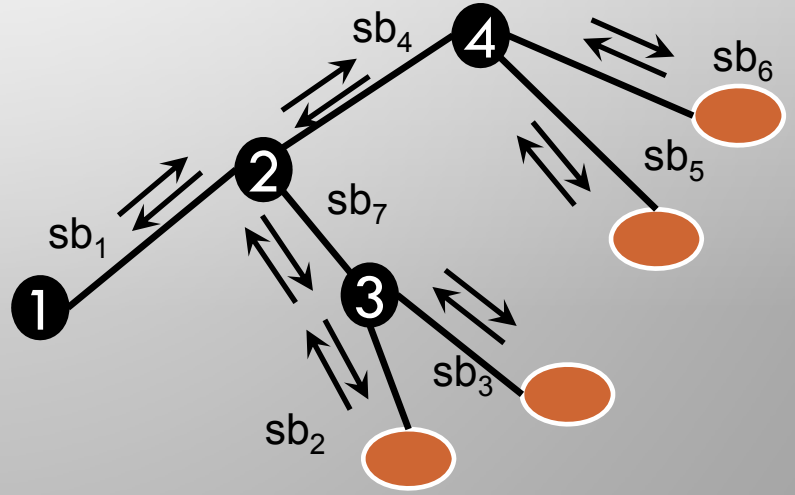
(k,n) per ciascun ramo



Rappresentazione "semplificata"

7 rami ⇒ 14 incognite

(k,n) per ciascun s-ramo

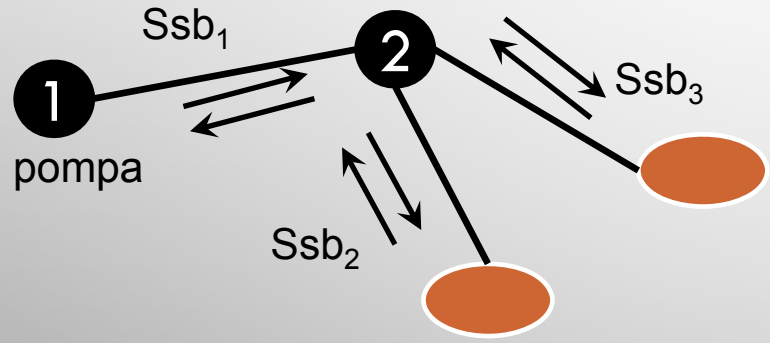


PROCEDURA PER IDENTIFICAZIONE

Non opportuno identificare tutto il sistema in unica soluzione

Conveniente identificare per sottosistemi

Esempio



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

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

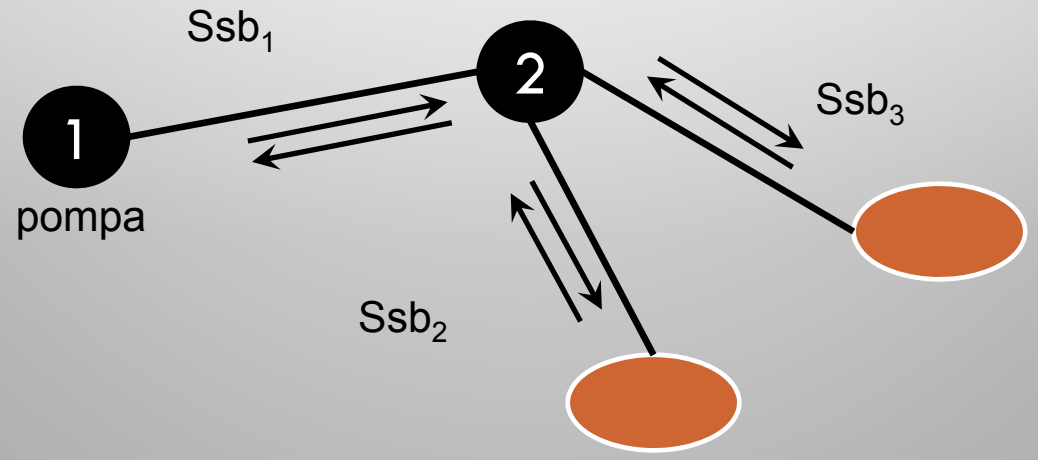
$$k_3 Q_{33}^{n3} = k_2 Q_{32}^{n2}$$

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

- 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 ⇒ necessario un altro set di misure (≠ setpoint)**

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 ⇒ **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 = residuo da minimizzare (→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**

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

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

$$\Delta P_{m3} - k_1 Q_{m3}^{n1} + k_2 Q_{32}^{n2} = 0 \Rightarrow S_i(\bar{x}) = 0 \Rightarrow F\begin{bmatrix} S_1(\bar{x}) \\ S_2(\bar{x}) \\ \vdots \\ S_n(\bar{x}) \end{bmatrix} = 0$$

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

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

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

$\Rightarrow$ **n ≥ 2**

IDENTIFICAZIONE DEL SISTEMA

RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT

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:

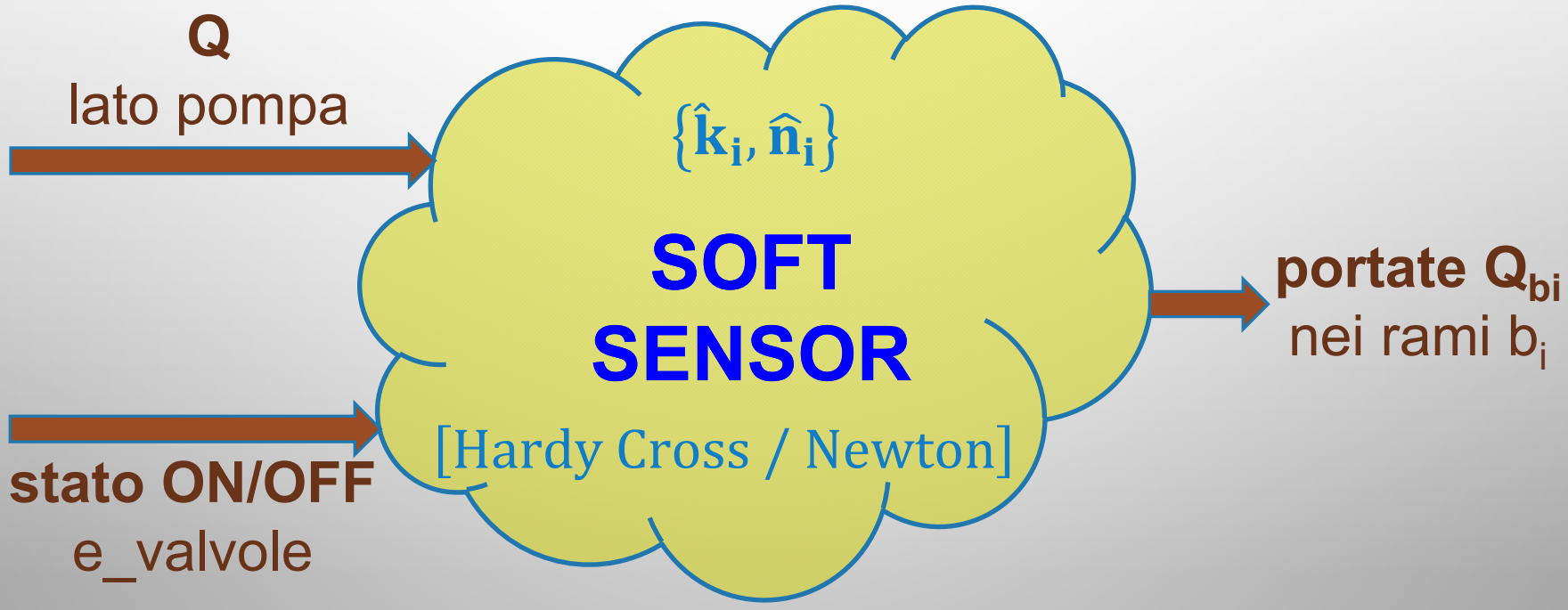
I parametri vengono utilizzati per stimare i flussi; questi sono comparati con quelli misurati

eventualmente

SOFT SENSOR

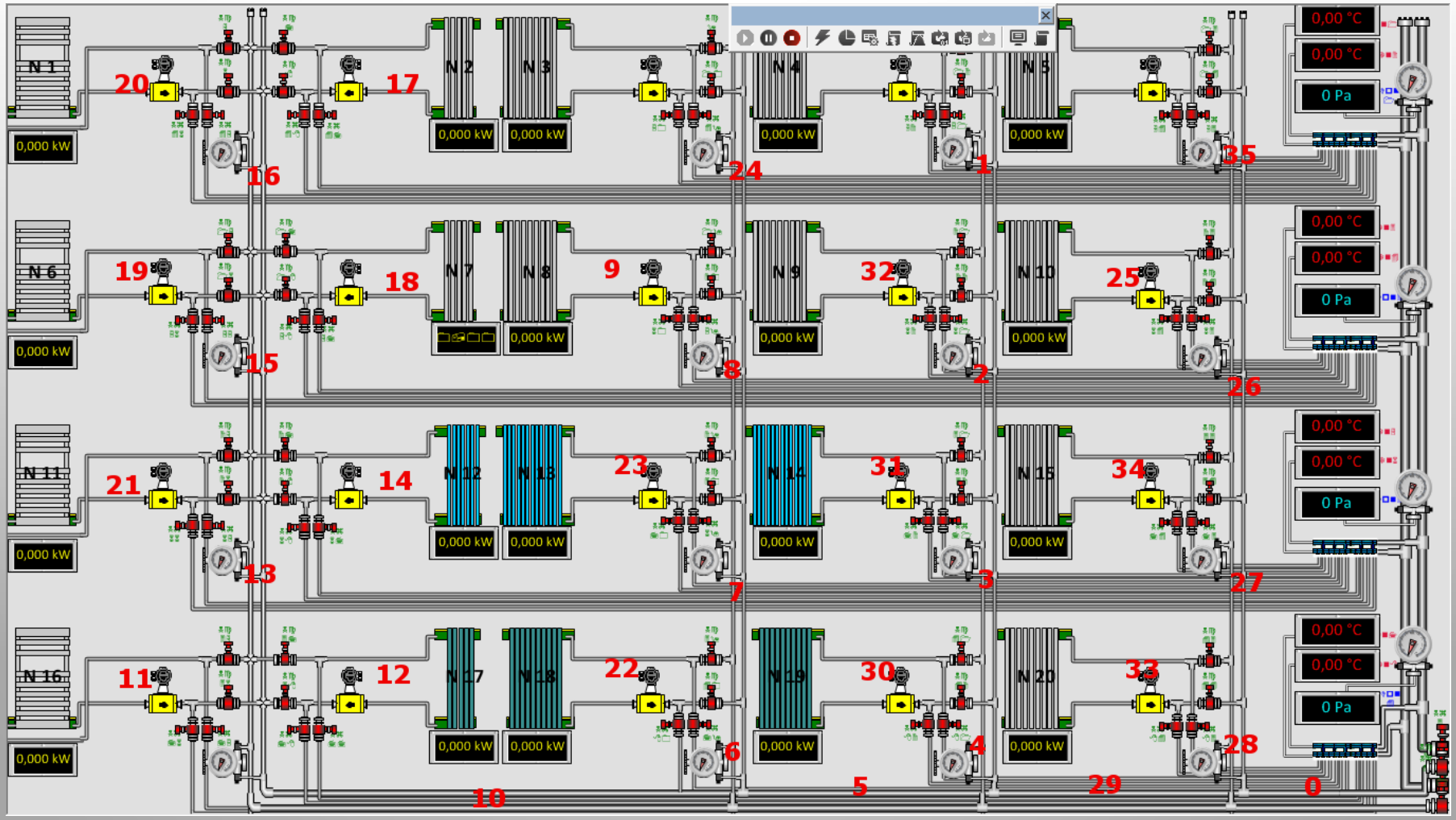
SOFT SENSOR – CONCLUSIONE

RTD UNDER FP7
GRANT CONTEXT

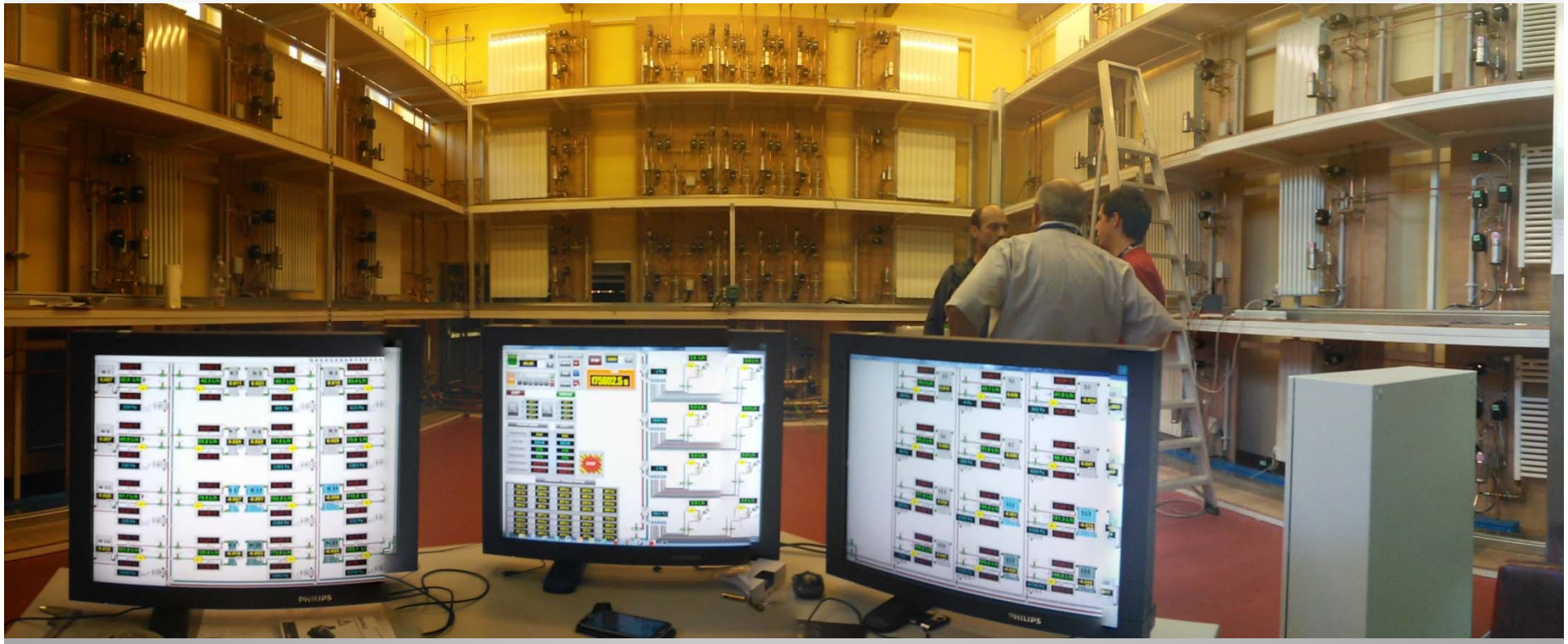


RISULTATI SPERIMENTALI

Schema *Movicon* parete nord



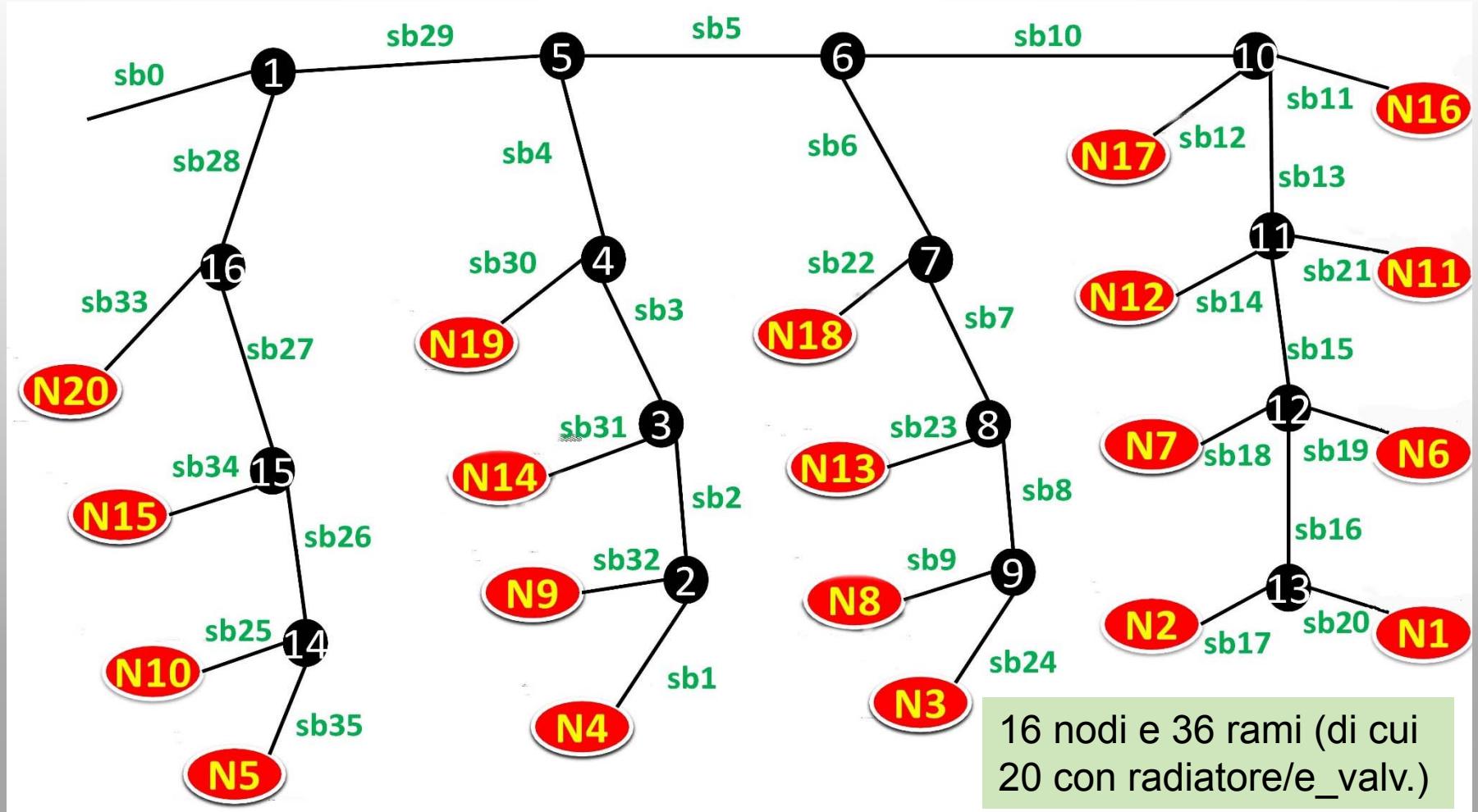
PARETE NORD (a sinistra)



PARETE NORD (a sinistra)

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^	n^	SymBr ID	Is EntryExit	IsElectricValve	k^	n^
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%**	