

# Supervisione e Controllo di Sistemi HVAC per una Gestione Efficiente degli Edifici

A. Beghi, L. Cecchinato, M. Rampazzo

*Seminario: Efficienza Energetica negli Edifici  
Aula Magna "A. Lepschy"  
Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione  
Padova, 17 Aprile 2010*



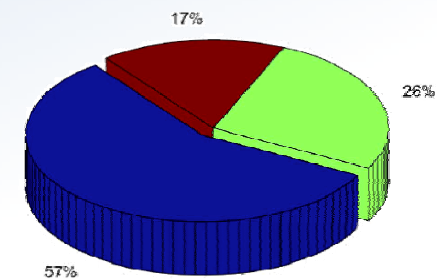
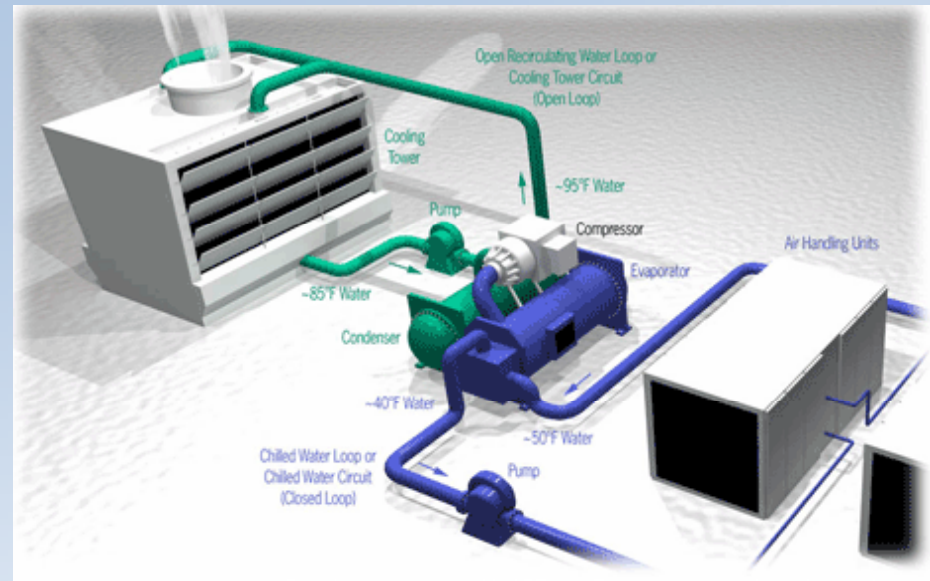
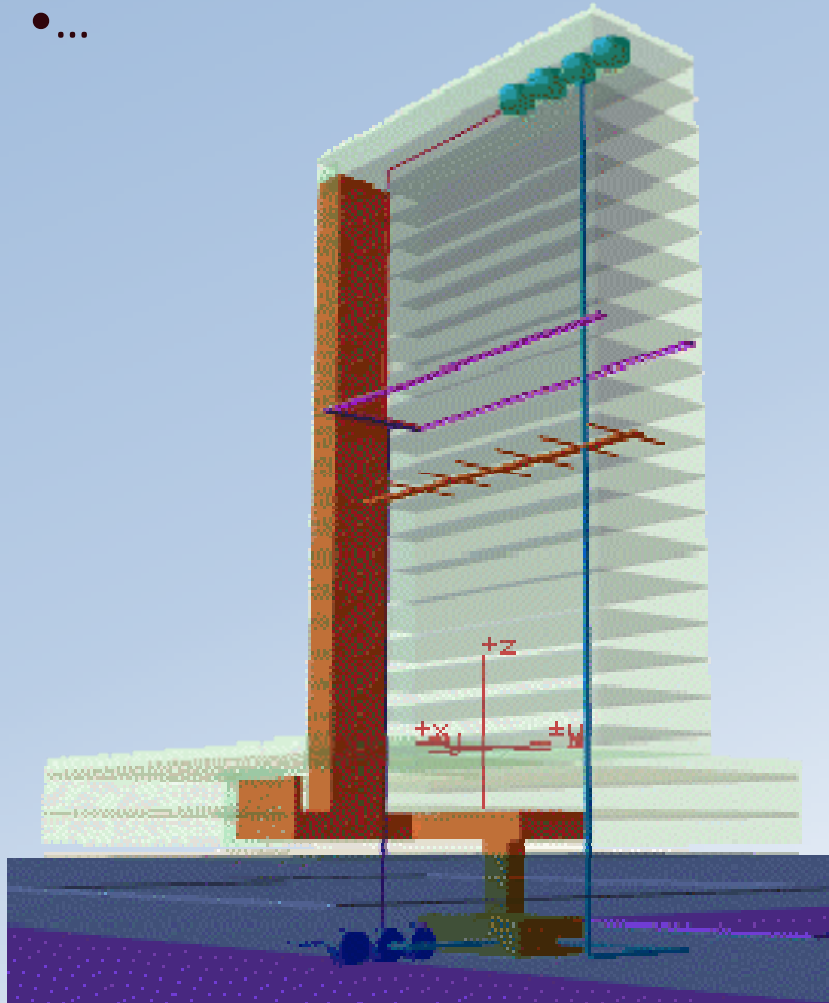


## Edifici di dimensioni medio-grandi

- Centri dirigenziali
- Ospedali
- Hotels
- ...

## Chiller

- componente chiave per sistemi HVAC medio-grandi
- consumo energetico superiore rispetto agli altri componenti del sistema HVAC



## Obiettivo

*Realizzazione di un supervisore per un sistema multi-chiller per il condizionamento dell'aria in grado di garantire contemporaneamente un elevato livello di comfort e una riduzione dei consumi.*

## Approccio di Prototipazione Virtuale

1. Sviluppo un modello matematico (in Matlab/Simulink).
2. Validazione su impianto sperimentale.
3. Sviluppo del controllo in ambiente virtuale.
4. Implementazione nel controllore fisico.
5. Validazione sperimentale del controllore.

### **Approccio:**

introdurre tutti i comportamenti dinamici rilevanti ai fini dello sviluppo del controllore, trascurando o semplificando altri fenomeni che contribuiscono solo marginalmente alla determinazione della prestazione globale dell'algoritmo.

### **Ipotesi:**

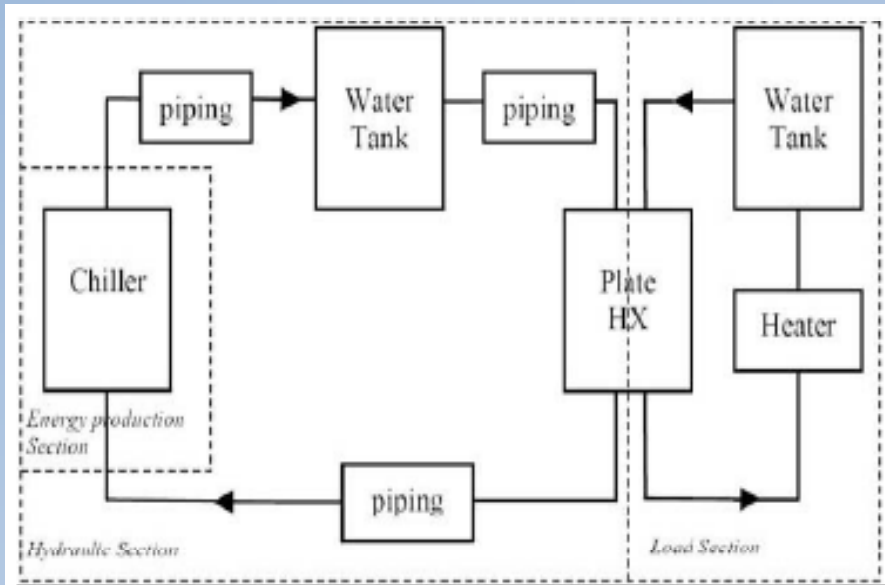
- Proprietà termofisiche dell'acqua costanti.
- Acqua fluido incomprimibile.
- Portata di massa costante nei circuiti idronici.
- Non vi è variazione del contenuto d'acqua all'interno dei componenti.
- Tubazioni e serbatoi adiabatici.
- Si trascurano i transitori legati ai fenomeni di trasporto di massa e di scambi termico nel chiller.

### **Equazioni:**

- Conservazione della massa.
- Conservazione dell'energia.
- Conservazione della quantità di moto.

## Discretizzazione

Schema a parametri concentrati.

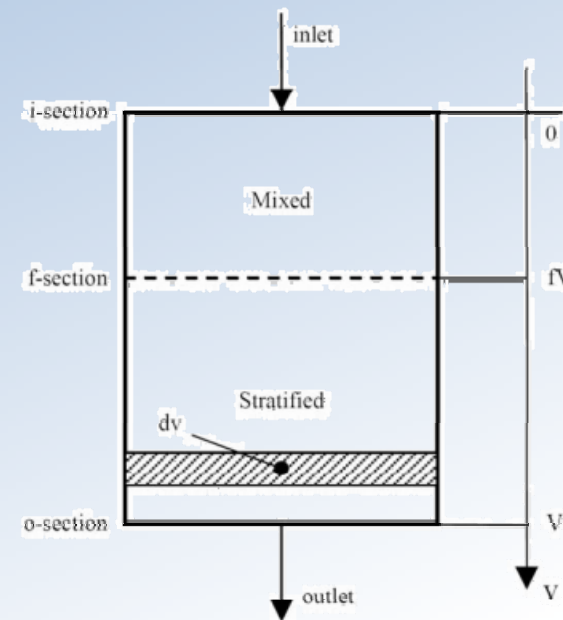
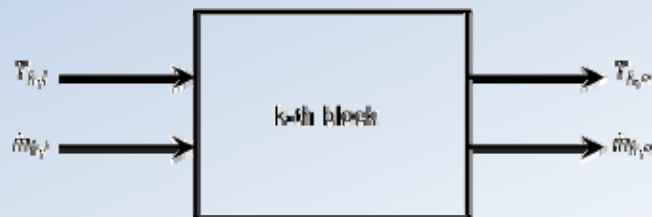


## Schematizzazione delle tubazioni e dei serbatoi

Ogni serbatoio è schematizzato in due sezioni separate connesse in serie:

1. nella prima si assume una condizione di completo miscelamento;
2. nella seconda si considera una perfetta stratificazione dell'acqua nel serbatoio.

- 1) Sezione produzione dell'energia.
- 2) Sezione idronica.
- 3) Sezione di carico.



$$W_k(s) = \frac{T_{k,o}(s)}{T_{k,i}(s)} = \frac{e^{-st_c}}{1 + s \frac{f_k \rho V_k}{\dot{m}_k}}$$

## Problema:

Sistema di equazioni differenziali non-lineari che configurano un problema di valore iniziale del prim'ordine.

## Condizioni al contorno:

- Portata di massa nella sezione idronica.
- Portata di massa nella sezione di carico.
- Temperature iniziali nei volumi di controllo.
- Dinamica del carico termico nella sezione di carico.

## Risoluzione:

Integrazione numerica a tempo discreto con metodo predittivo-correttivo di Gear adatto a problemi di tipo *stiff*, ovvero problemi che presentano scale di evoluzione nel tempo estremamente variabili.

## Impianto di prova

**Chiller:** monoblocco condensato ad aria Rhoss THAEY 245, equipaggiato con 2 compressori scroll di taglie diverse, con rapporto di cilindrata pari a 1.35.

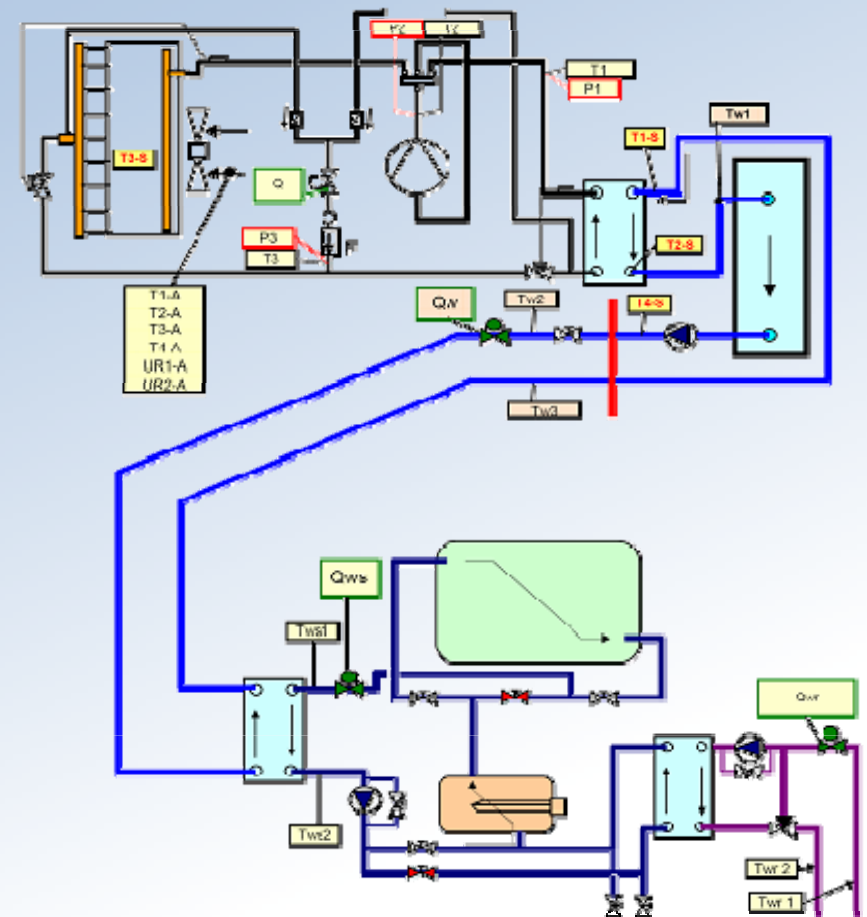
### Condizioni operative:

- temperatura dell'aria in ingresso al condensatore 35°C;
- temperatura dell'acqua di mandata 7°C;
- salto termico all'evaporatore 5°C.
- condizioni di carico: 100%, 75%, 50%, 25%.

### Prestazioni:

- Resa frigorifera: 42.6 kW

P&ID

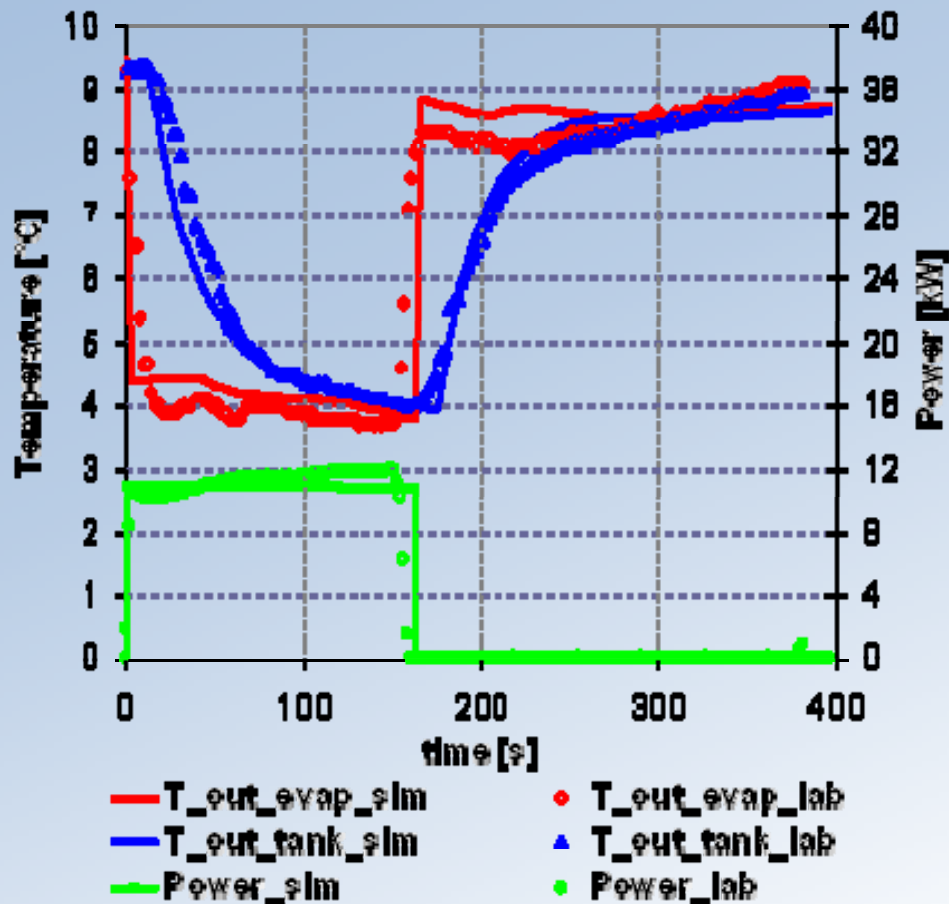




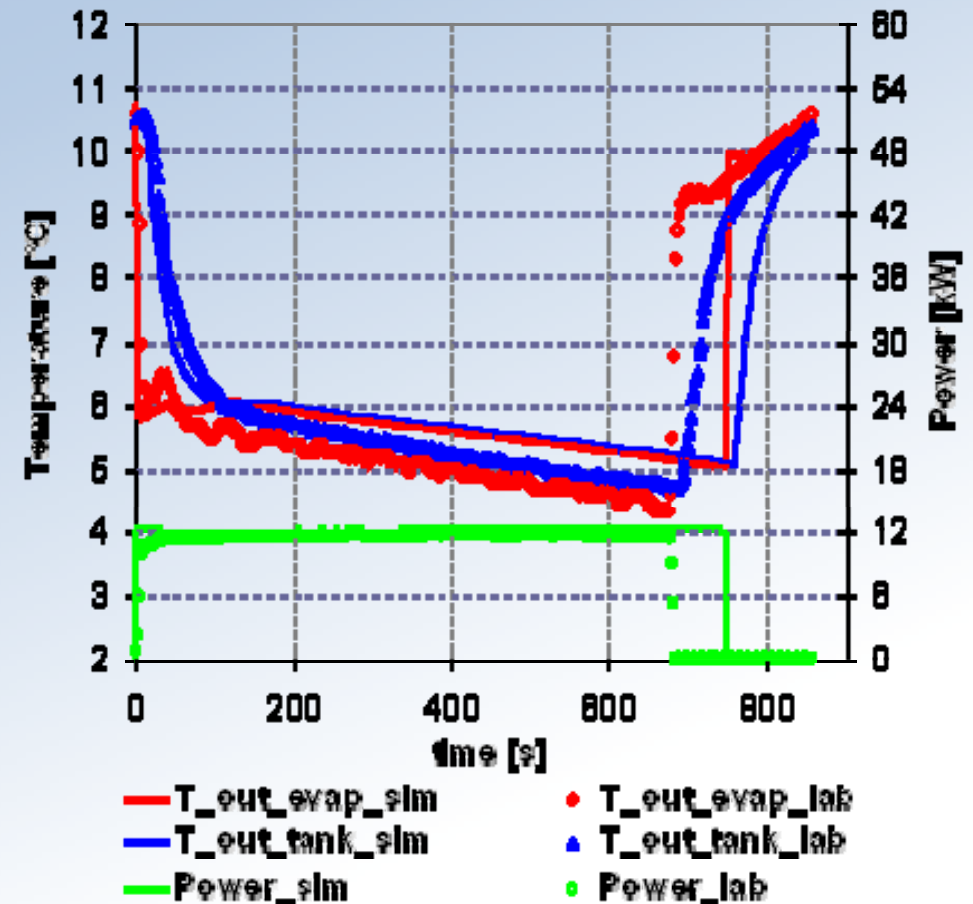
## Prove sperimentali: campagna di validazione

Il modello dinamico di simulazione è stato validato ed è adeguato a riprodurre le dinamiche principali utili ai fini del problema di controllo.

20% Part Load



75% Part Load



# Caratterizzazione energetica del chiller

- Potenza erogata:  $P_{c,full}(t) = a_c + b_c T_{chwr}(t) + c_c T_{air}(t) + d_c \dot{m}_w(t) + e_c T_{chwr}(t) \dot{m}_w(t)$
- Potenza assorbita:  $P_{e,full}(t) = a_e + b_e T_{chwr}(t) + c_e T_{air}(t) + d_e \dot{m}_w(t) + e_e T_{chwr}(t) \dot{m}_w(t)$

$$EER_{i,full} = \frac{P_{c,i,full}}{P_{e,i,full}}, \quad PLR_i = \frac{P_{c,i,R}}{P_{c,i,full}}, \quad EER_{i,R} = \frac{P_{c,i,R}}{P_{e,i,R}}$$

## Penalità (carichi parziali):

$$Y_i = \frac{EER_{i,R}}{EER_{i,full}}$$

$$Z_i = \frac{P_{e,i,R}}{P_{e,i,full}}$$

$$Q_{i,R} = PLR_i P_{c,i,full} \Delta T$$

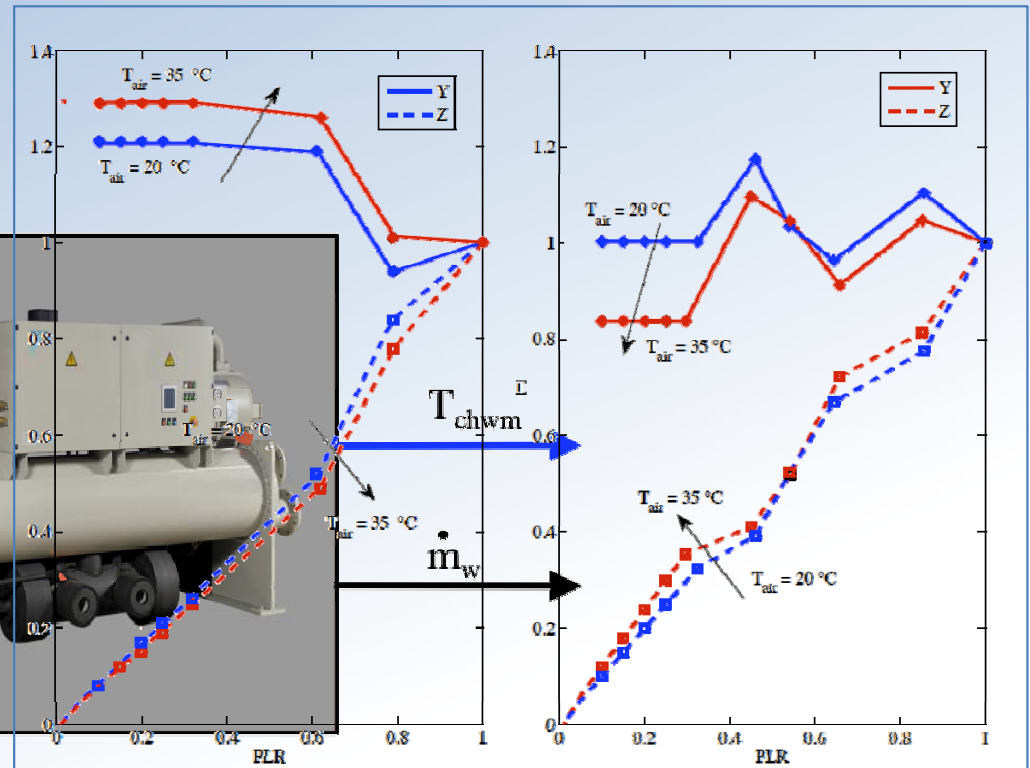
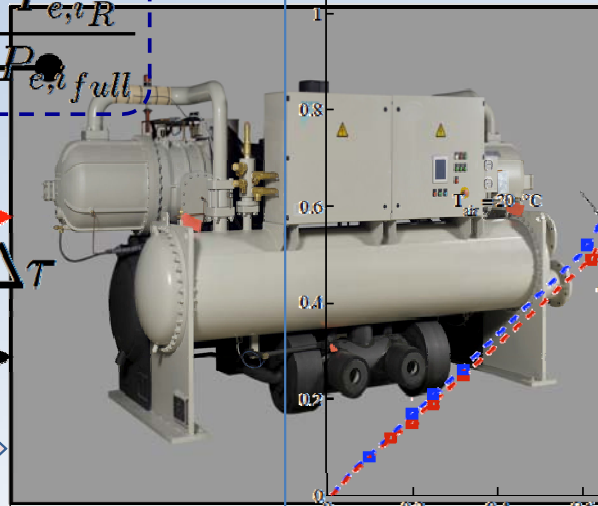
$$E_{i,R} = Z_i P_{e,i,full} \Delta T$$

$T_{set}, PLR$

$T_{chwr}$

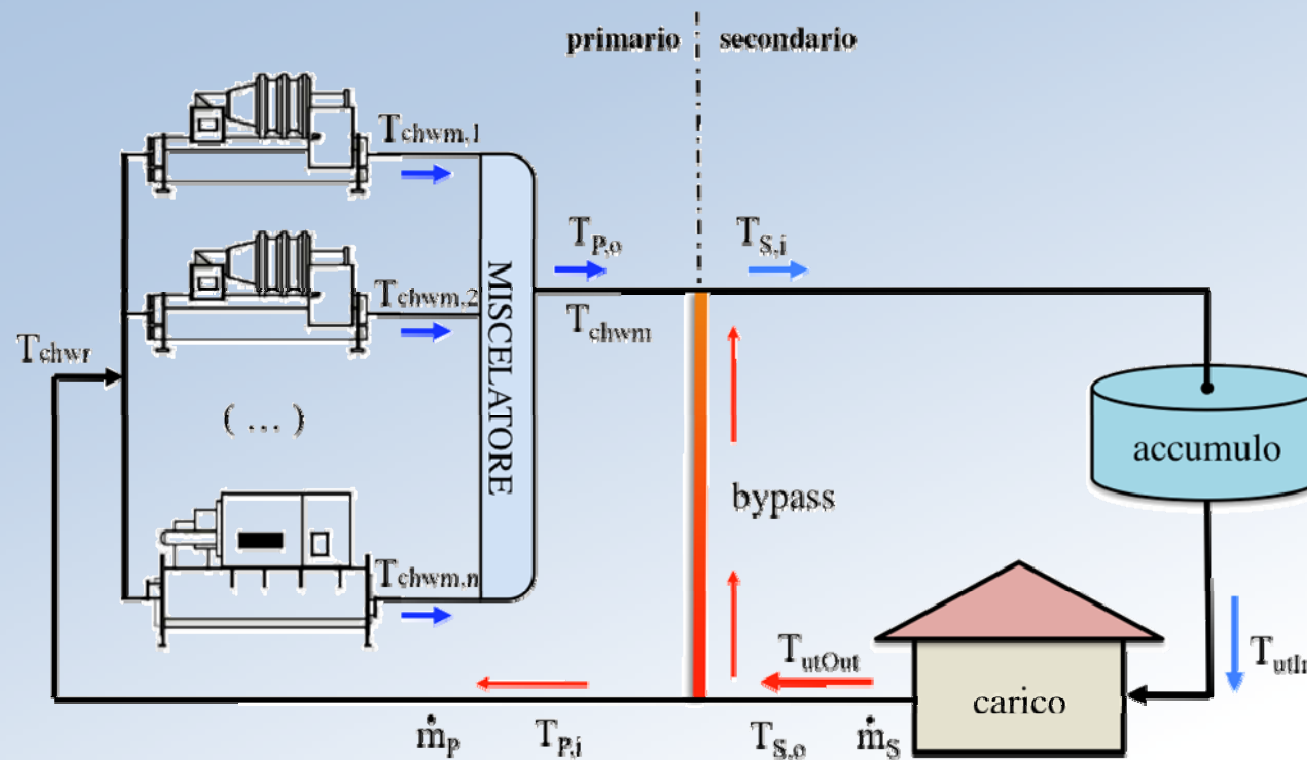
$\dot{m}_w$

$T_{air}$



## L'impianto considerato:

- architettura primario-secondario (bypass)
- $n$  chiller in parallelo
- controllo dei chiller in mandata, portata costante
- serbatoio d'accumulo



## Controllo sulla temperatura di mandata

### Parametri che influiscono sulla regolazione dei gruppi frigoriferi:

- Setpoint (parametro interno)
- Differenziale (parametro interno)
- Salto termico (parametro esterno, dipende dall'impianto)

### Vantaggi della regolazione sulla mandata:

- Temperatura media in uscita costante pari al setpoint
- Temperature max e min in uscita corrispondono al differenziale
- Consente regolazioni più fini
- Maggiore efficienza ai carichi parziali

Nota: deve essere studiata con attenzione

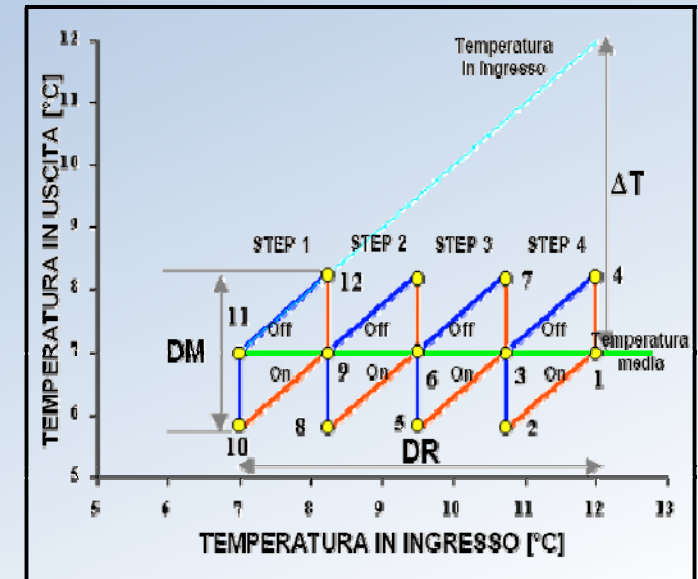
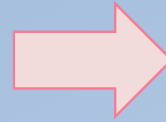
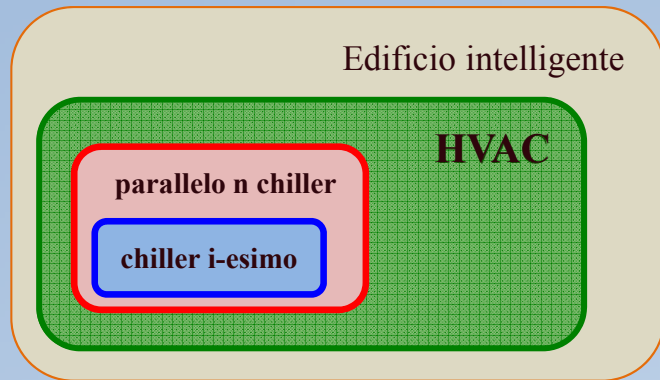
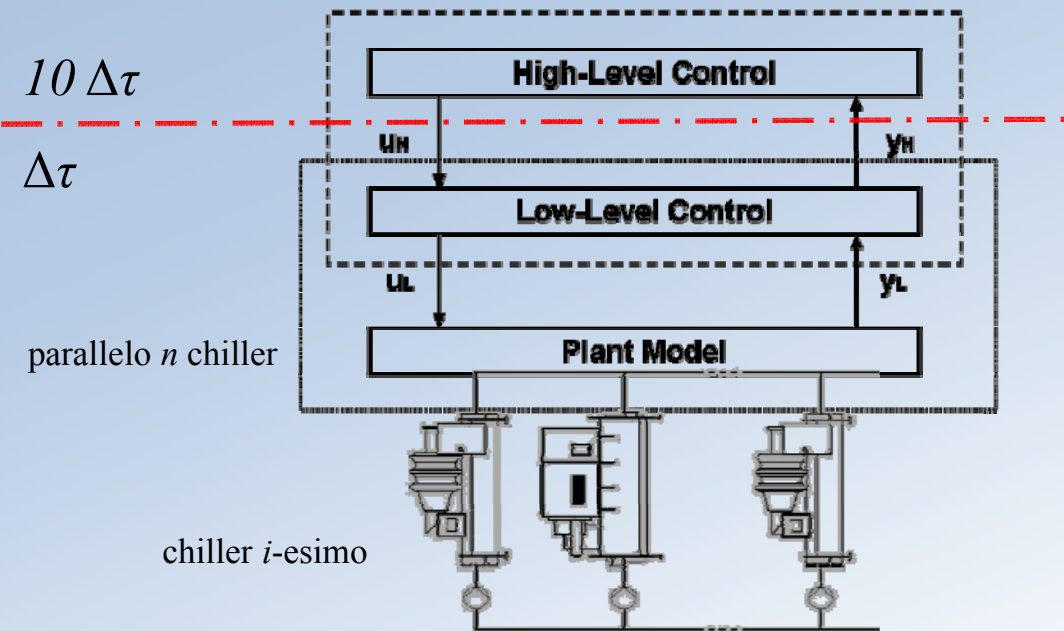


Figura 1: diagramma di regolazione di un gruppo frigorifero con quattro gradini di parzializzazione (situazione ideale)

## Sistemi compositi



## Struttura a più livelli



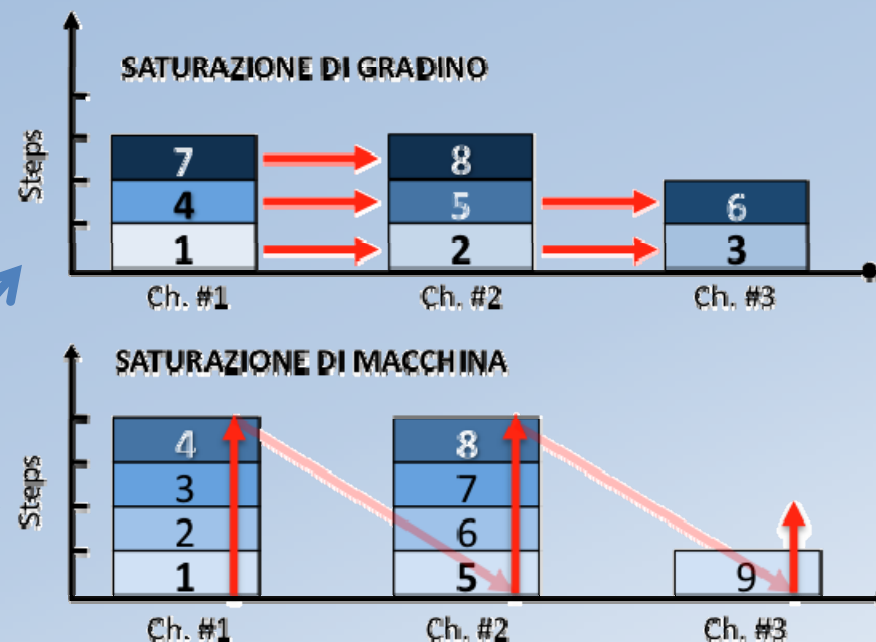
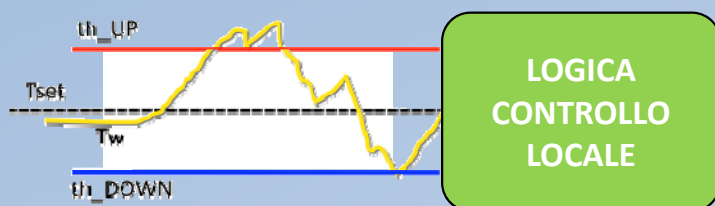
### Struttura multi livello della regolazione:

**L) controllori locali (logiche di controllo):** assicurano il mantenimento di un particolare setpoint o l'inseguimento di un qualche riferimento;

**H) regolazione di alto livello (SUPERVISORE):** livello alto si occupa di definire i setpoint e le condizioni di funzionamento

## Strategie classiche di regolazione:

- (SS) saturazione di gradino
- (MS) saturazione di macchina



## Gestione ottimale dei chiller:

- **OCL** (*Optimal Chiller Loading*): ripartizione ottima del carico
- **OCS** (*Optimal Chiller Sequencing*): selezione ottima dei chiller (on/off)

**NB:** necessarie informazioni sul carico e sui chiller

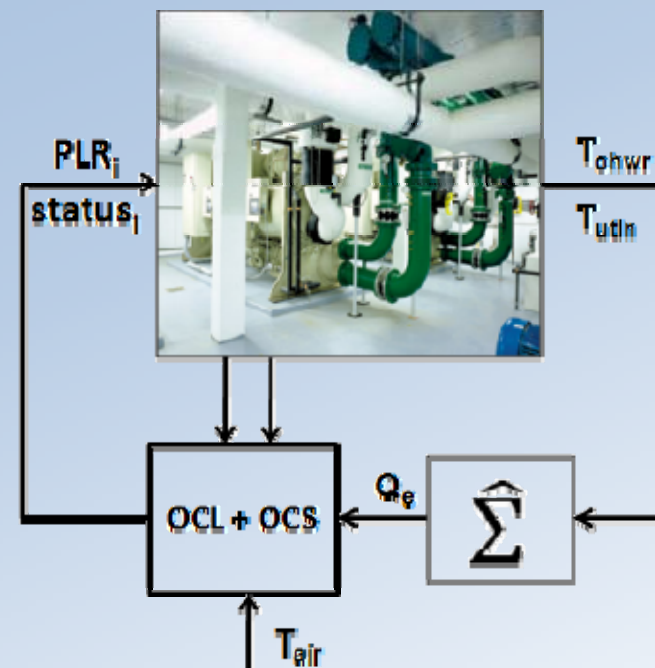
## Formulazione del problema:

$$\arg \min_{PLR_i, status_i} \sum_i E_{iR}(t) \quad \left\{ \begin{array}{l} \sum_i Q_i(t) = Q_{LOAD}(t) \\ |PLR_i(t) - PLR_i(t-1)| \leq \kappa_i, \quad i = 1, \dots, n_{ch} \end{array} \right.$$

## Stima del Carico

Gestione chiller attraverso le grandezze misurabili nel locale macchine

- 1 serve stima del carico dell'edificio
- 2 il supervisore assegna PLR  $\rightarrow$  **set-point** acqua uscita chiller



### Osservatore dello stato

- Ipotesi di carico lentamente variabile
- Modello di stato
- Stima del carico richiesto

## PROGETTO 1: SUPERVISORE GENETICO

### A) Rappresentazione di un individuo della popolazione:

individuo	$PLR_1^{(1)}$	...	$PLR_1^{(10)}$	stato <sub>1</sub>	$PLR_2^{(1)}$	...	$PLR_2^{(10)}$	stato <sub>2</sub>	$PLR_3^{(1)}$	...	$PLR_3^{(10)}$	stato <sub>3</sub>
(...)	$PLR_1^{(1)}$	...	$PLR_1^{(10)}$	stato <sub>1</sub>	$PLR_2^{(1)}$	...	$PLR_2^{(10)}$	stato <sub>2</sub>	$PLR_3^{(1)}$	...	$PLR_3^{(10)}$	stato <sub>3</sub>
individuo N	$PLR_1^{(1)}$	...	$PLR_1^{(10)}$	stato <sub>1</sub>	$PLR_2^{(1)}$	...	$PLR_2^{(10)}$	stato <sub>2</sub>	$PLR_3^{(1)}$	...	$PLR_3^{(10)}$	stato <sub>3</sub>

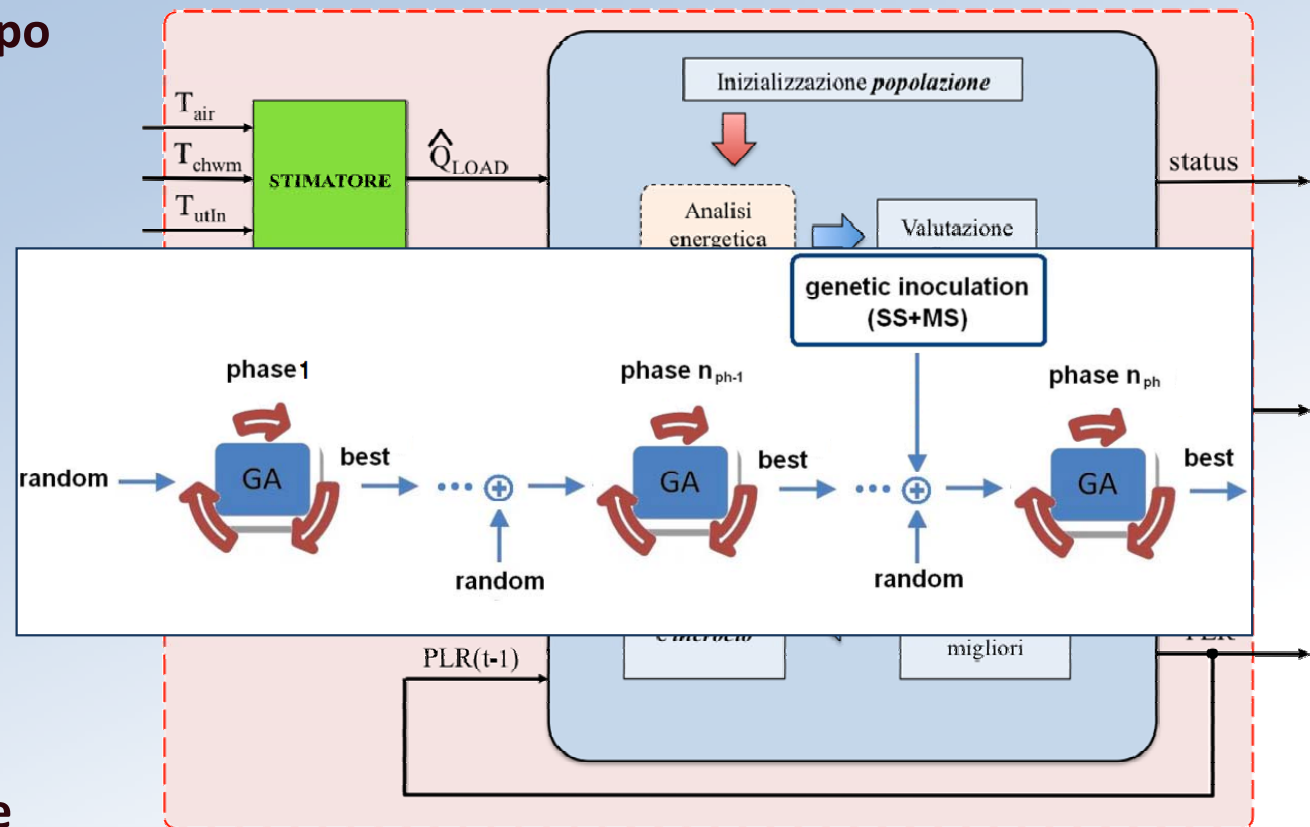
### B) Codifica genotipo → fenotipo (binaria)

### C) Operatori genetici:

- selezione
- riproduzione
- mutazione
- ricombinazione

### D) “Ciclo evolutivo”

### E) Implementazione multi-fase





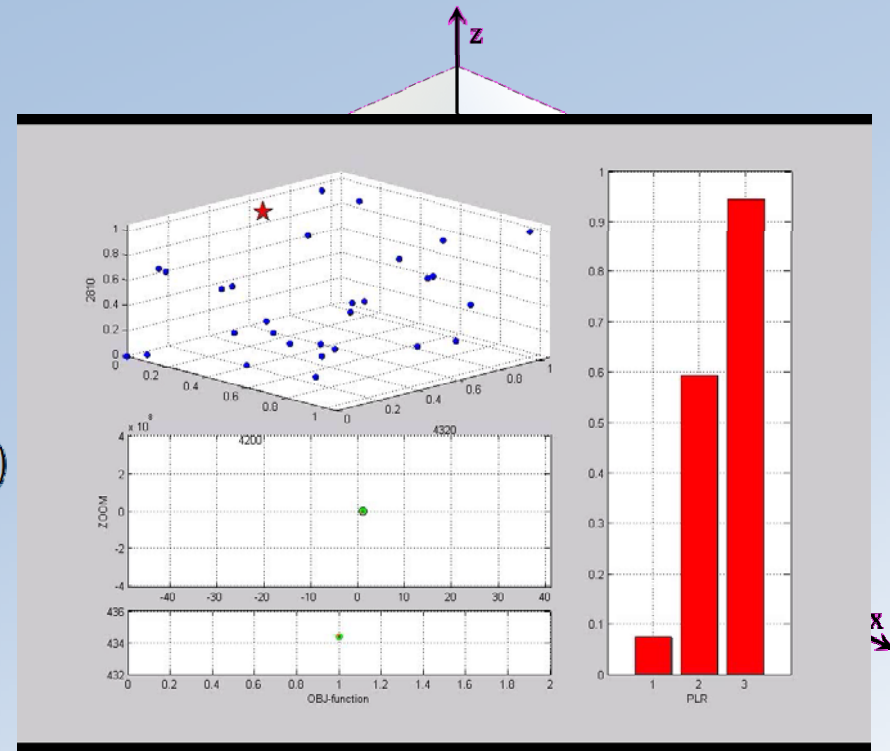
# PROGETTO 2: SUPERVISORE PARTICELLARE

## Dinamica di una particella:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \\ \mathbf{v}(k+1) = \mu \mathbf{v}(k) + \rho_p (\mathbf{x}_{p,best} - \mathbf{x}(k)) + \rho_g (\mathbf{x}_{g,best} - \mathbf{x}(k)) \end{cases}$$

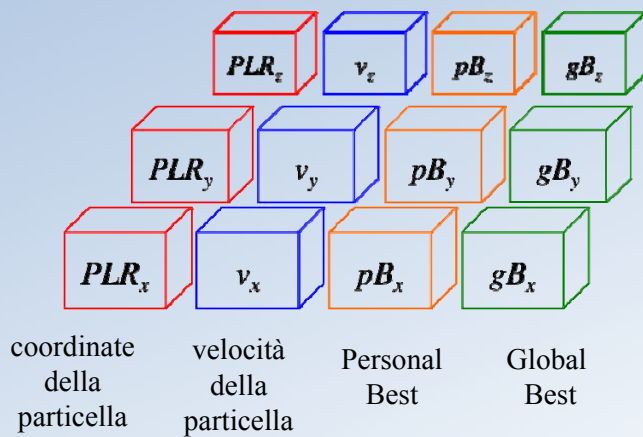
Componente personale :  $\rho_p (\mathbf{x}_{p,best} - \mathbf{x}(k))$   
*Ricerca della soluzione ottima di un OCL problem con 3 chiller, tramite sciame di*

Componente globale :  $\rho_g (\mathbf{x}_{g,best} - \mathbf{x}(k))$   
*30 particelle*

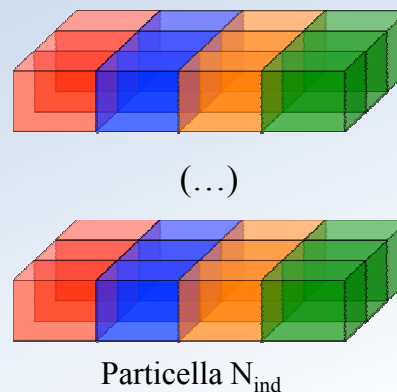


## Rappresentazione di un individuo e dello sciame:

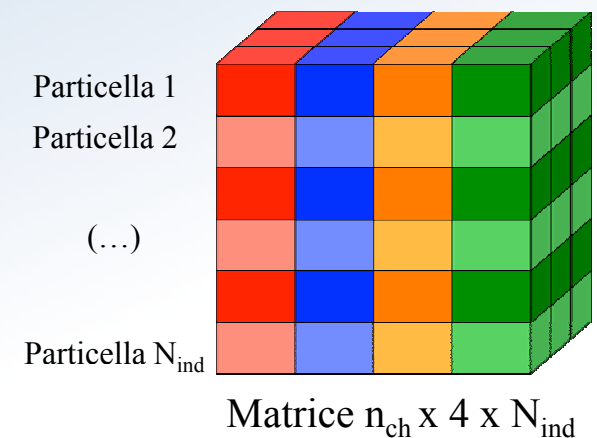
Individuo: grandezze



Particella: Matrice  $n_{ch} \times 4$

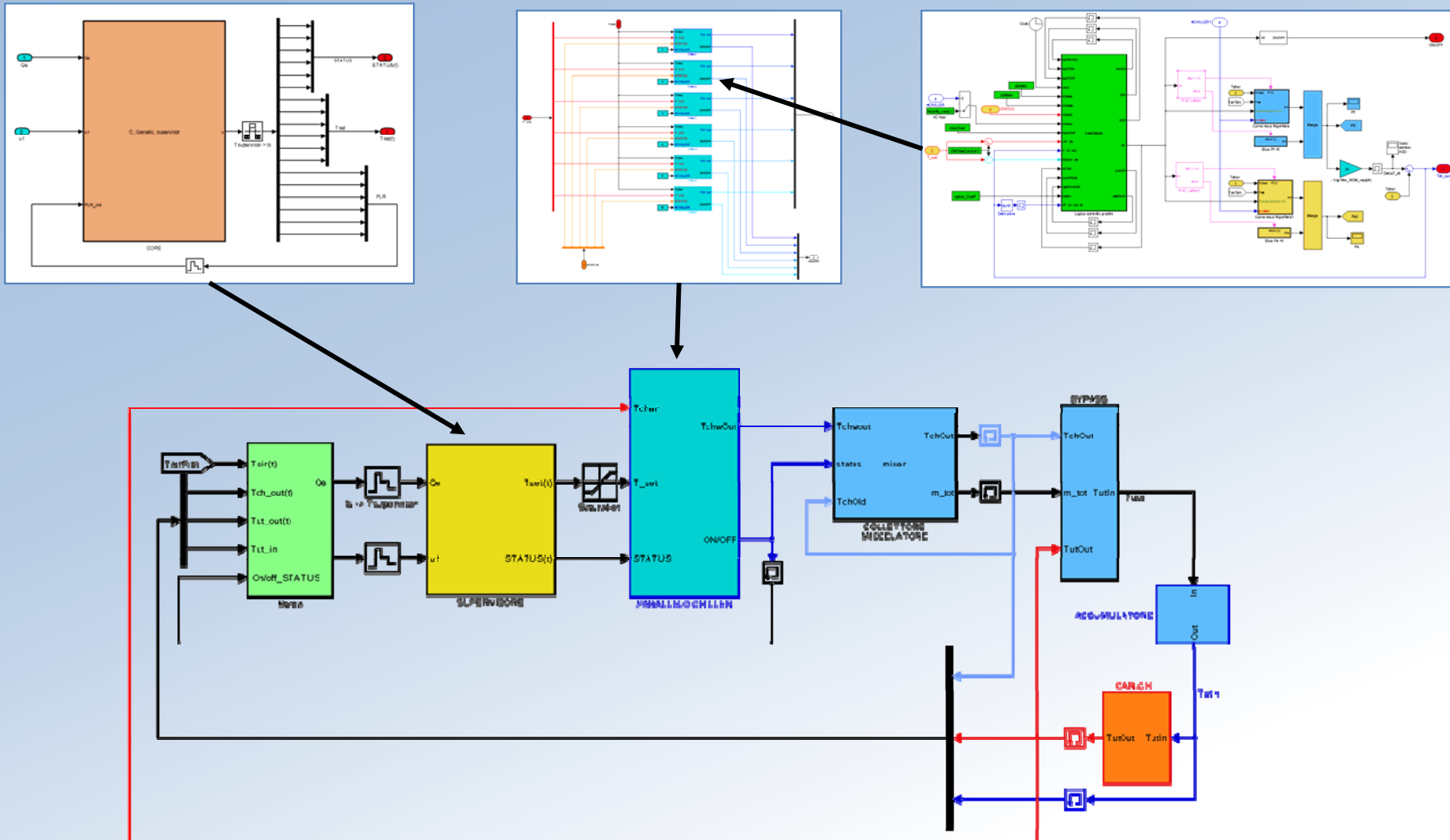


Sciame: struttura dati



# Simulazione impianto:

Modelli matematici implementati in Matlab e Simulink.



SIMULAZIONE:	3 CH SCROLL	4 CH VITE	2 CH SCROLL + 2 CH VITE	POMPA CALORE
Carico Richiesto [kWh]	450250	1145057	986580	548007
Carico frigorifero MS [kWh]	499280	134635	116100	580495
Carico				
Carico				
Carico				
STD err				
STD err				
STD err				
STD err				
STD err <sub>TEMP</sub> MS [°C]	0.2953	0.3327	0,3435	0,2955
STD err <sub>TEMP</sub> SS [°C]	0.2951	0.3235	0,3385	0,2959
STD err <sub>TEMP</sub> AG [°C]	0.1250	n.d.	0,0958	0,1542
STD err <sub>TEMP</sub> PSO [°C]	0.0817	0.1055	0,0971	0,0900
EER MS	3.3157	3.2821	3,2897	2.6476
EER SS	3.7207	3.3241	3,4168	2.6808
EER AG	3.5361	n.d.	3,3942	2.8085
EER PSO	3.9420	3.3159	3,5390	2.7531
Δ% EER (AG-MS)	6.65	n.d.	3,18	6.08
Δ% EER (AG-SS)	4.98	n.d.	7,-0,65	4.76
Δ% EER (PSO-MS)	19.03	2.25	7,58	3.98
Δ% EER (PSO-SS)	6.08	0.96	3,59	2.70

Confronto delle dinamiche della temperatura dell'acqua in mandata.

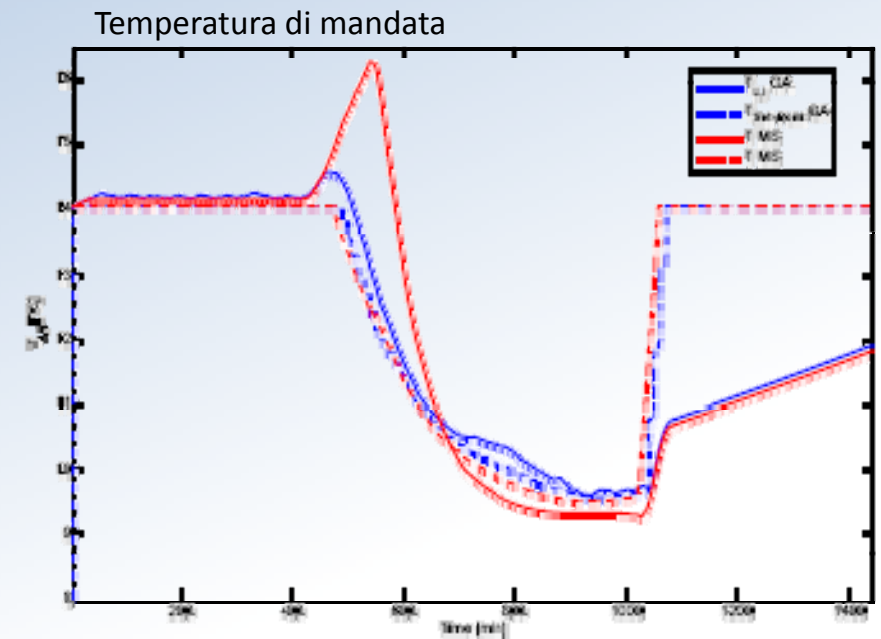
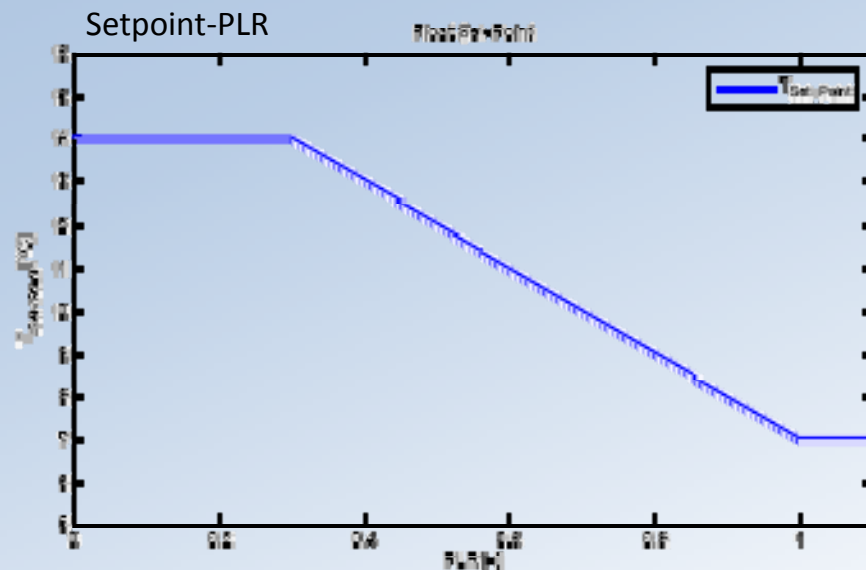
**Osservazioni:**

- maggiore regolarità della temperatura dell'acqua in mandata;
- conseguente regolarità delle temperature nei vari punti dell'impianto;
- prestazioni migliori anche dal punto di vista del comfort;
- necessità di introdurre un nuovo indice di prestazione;

## Strategia a setpoint flottante

La conoscenza della stima del carico richiesto consente di adottare strategie di regolazione a setpoint flottante in funzione del fabbisogno energetico con conseguente risparmio dei consumi.

	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	seasonal
Cooling energy $MCM_{Flt}$ [kWh]	4482	8928	1228	15093	13397	10233	64362
EER $MCM_{Flt}$	5.671	4.835	4.407	3.811	4.051	4.498	4.302
$\Delta EER (MCM - MS) \%$	25.81	17.81	13.68	9.79	11.94	17.79	14.04
$\Delta EER (MCM - SS) \%$	26.21	11.38	13.83	7.06	11.74	12.22	11.64
$\Delta EER (MCM_{Flt} - MCM) \%$	21.81	10.02	9.19	5.56	9.50	11.22	9.37



## Algoritmi Genetici per la progettazione di sistemi HVAC complessi energeticamente efficienti

### Selezione ottimale impianto

- deve **selezionare** una combinazione di **macchine** adeguata alle richieste e ai vincoli progettuali
- deve selezionare l'impianto con **costi minori** in un certo arco temporale (**costi di acquisto + costi di utilizzo**)
- deve tener conto della **strategia di gestione** dell'impianto per valutarne i consumi e conseguentemente i **costi di utilizzo**

### Gestione efficiente

- il problema è complesso per impianti multi-chiller
- una gestione scorretta aumenta marcatamente i consumi
- un'ottimizzazione può comportare significativi risparmi energetici ed economici

## Conclusioni

- Modello componenti/impianto
- Ambiente di simulazione
- Strategia di supervisione (Soluzioni OCL e OCS)
- Risparmio energetico
- Controllore/supervisore
- Possibilità di impiego in fase di progettazione
- ...

# GRAZIE DELL'ATTENZIONE

- Alessandro Beghi: [beghi@dei.unipd.it](mailto:beghi@dei.unipd.it)
- Luca Cecchinato: [ceck@unipd.it](mailto:ceck@unipd.it)
- Mirco Rampazzo: [mirco.rampazzo@dei.unipd.it](mailto:mirco.rampazzo@dei.unipd.it)

