



Controllo del comfort termoigrometrico in ambienti lavorativi moderati



Autori:

Baro Fabio

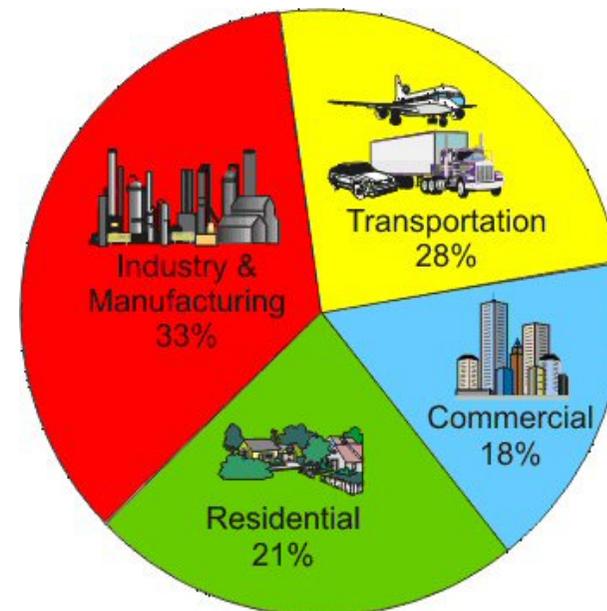
Favero Alessandro

Spitaler Christian



Motivazione

- Necessità di garantire condizioni ambientali confortevoli
- Contenimento del consumo energetico





Stato dell'arte modellistica

Molti approcci con diversi livelli di accuratezza e complessità.

- Comportamento termico e/o igrometrico
- Disturbi interni ed ambientali considerati
- Dimensione: Single-room o Multi-room
- Forma non lineare o lineare

Modelli molto evoluti realizzati con programmi appositi (Freire et al, Mehta et al).



Stato dell'arte controllo – commerciale

- Controllo termico passivo
- Controllo attivo semplice:
on/off, PID
- Combinazione dei due tipi
(p.e. Bank of America Tower, NY)
- Controlli più sofisticati di norma
solo nell'ambito industriale





Stato dell'arte controllo - scientifico

- Controllo passivo
- Controllo attivo:

Controllo ottimo LQR (p.e. Tosin)

Controllo predittivo MPC (Freire et al)

Tipologie di controllo: locale, regionale, centralizzato.



Novità e modifiche introdotte

- Linearizzazione particolare dell'indice PMV
- Modello in spazio di stato di un edificio composto da otto stanze
- Modellizzazione della componente igrometrica
- Uso di dati meteorologici reali (ARPAV)
- Implementazione di molti controllori diversi e relativo confronto in termini di comfort e consumo





Proposte di soluzione

- Controllo attivo del PMV mediante PI, LQR e MPC
- Implementazione come controllo locale, regionale e centralizzato

Risultati

- Controllo del PMV lineare problematico
- Controllori sofisticati danno risultati migliori
- LQR meglio del MPC
- Tipologia di controllo: si promuove il locale



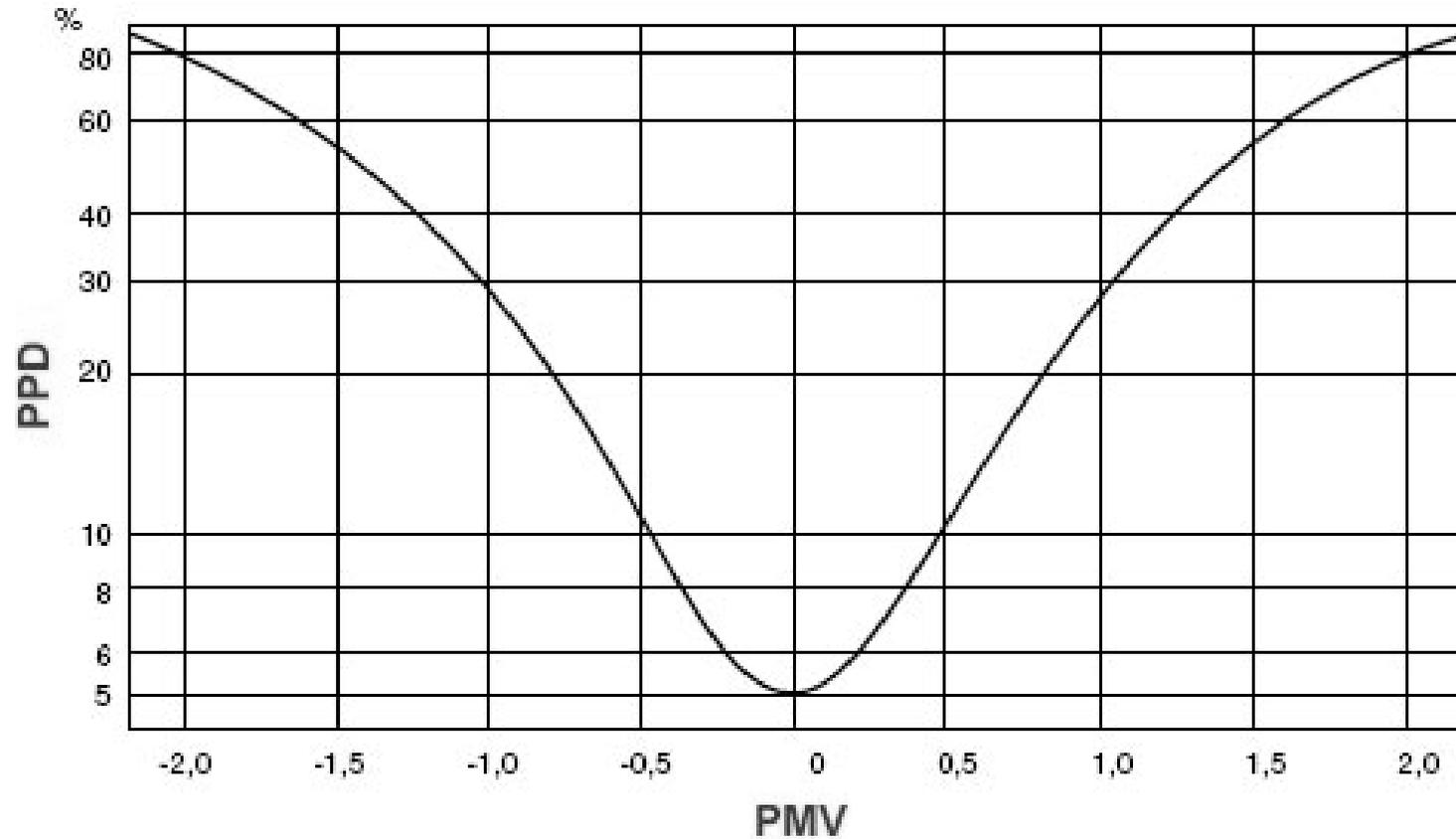
Comfort termoigrometrico

“Stato in cui un individuo non ha né sensazione di caldo né di freddo.” (Cesaratto, Villi, Bettenzoli)

Valutazione:

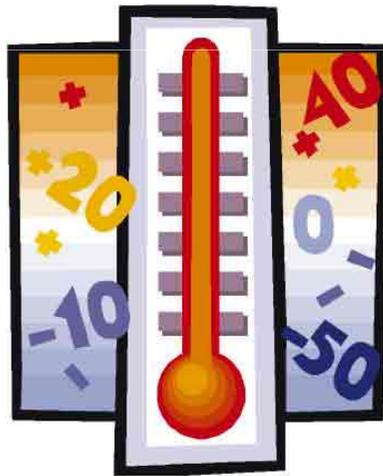
- In funzione di temperatura e umidità assoluta
- Indici di benessere termico: PMV, PPD

- PMV linearizzato:
$$PMV = h_1(T_a - T_{a,L}) + h_2(\psi - \psi_L)$$





$$PMV = f(T_a, \psi)$$



T_a

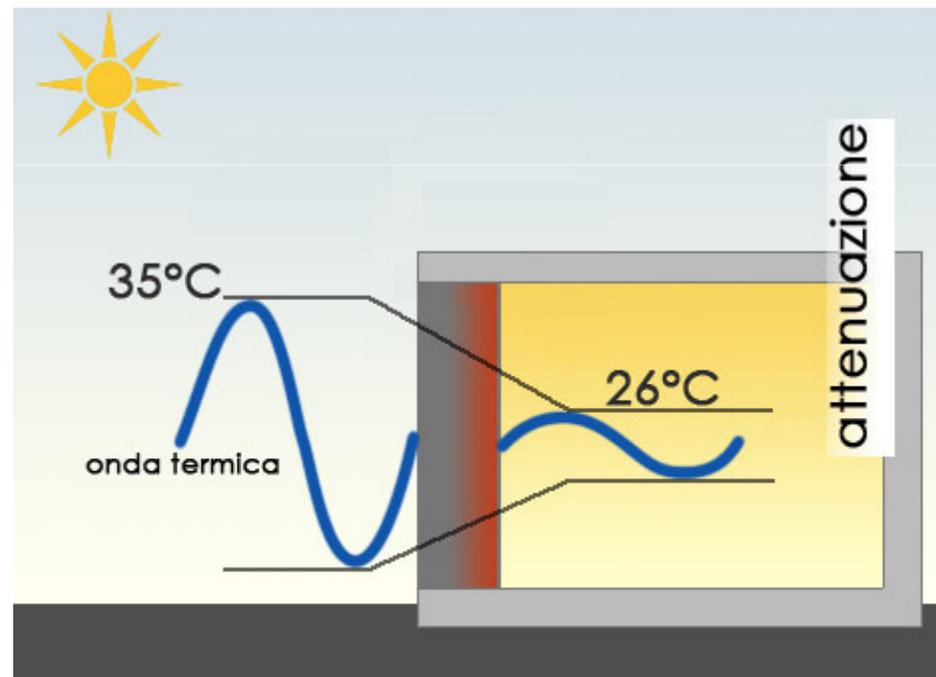


ψ



Ipotesi semplificative

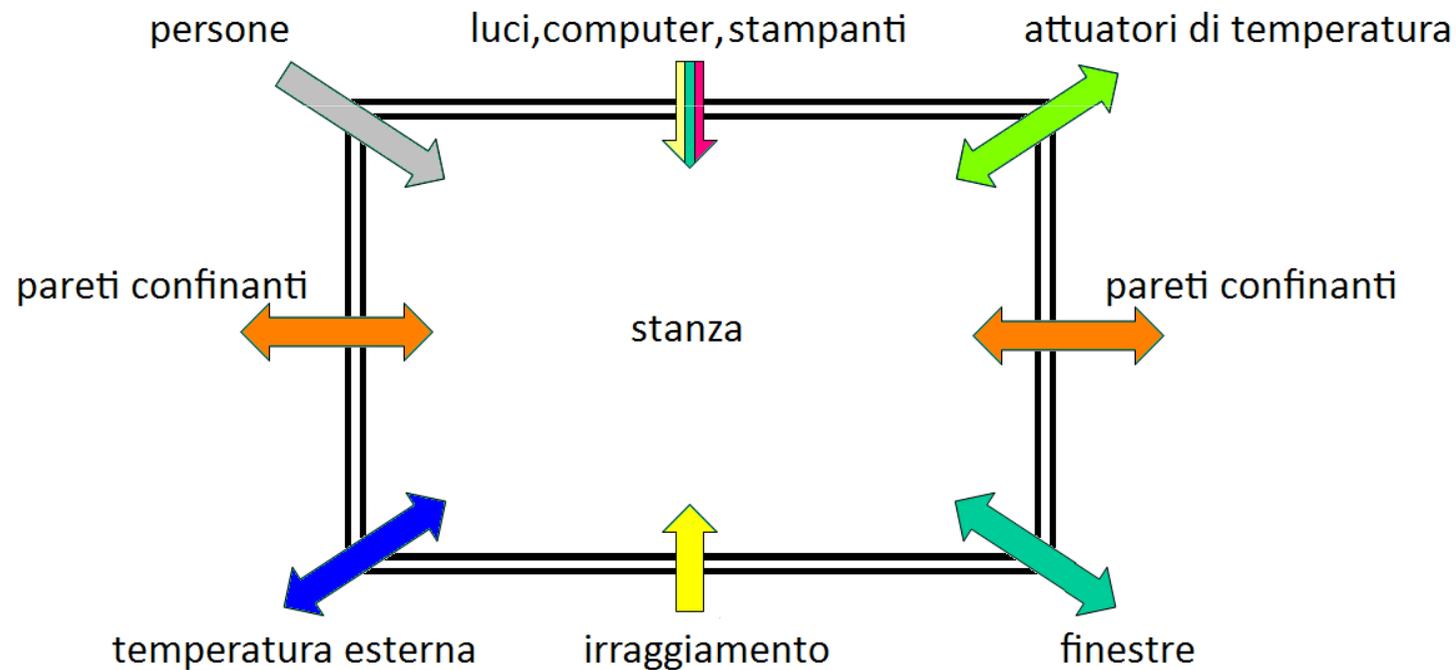
Nel modello termico non si considera l'accumulo di calore nelle pareti.





Bilancio energetico

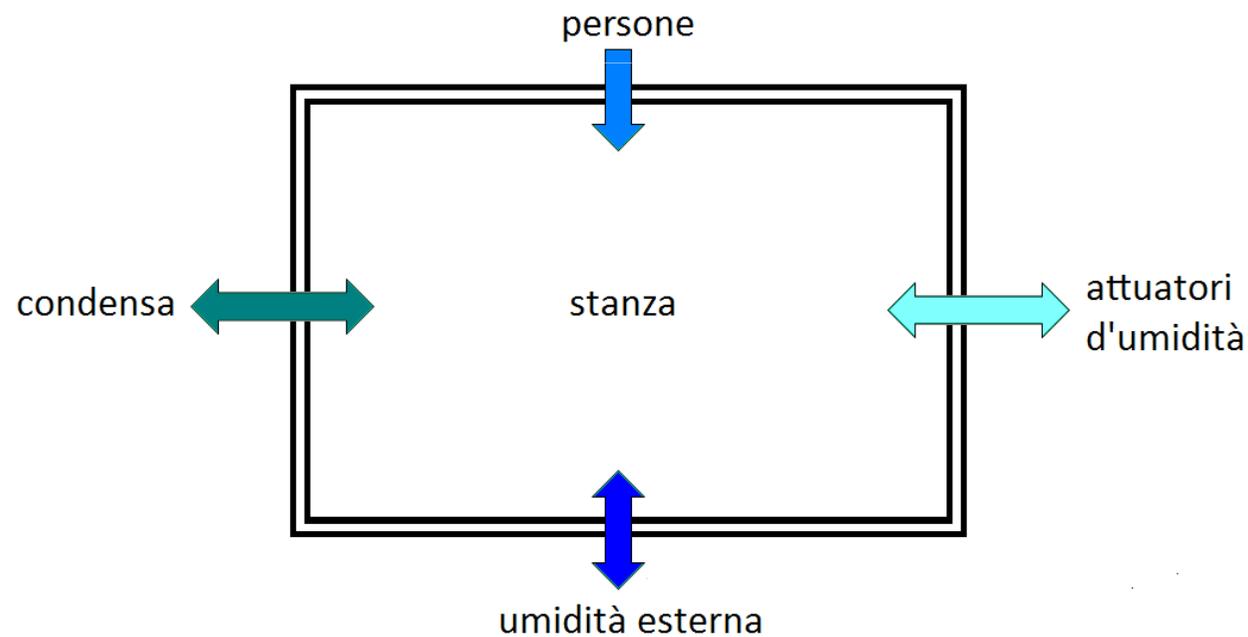
$$q_{aria} = q_{persone} + q_{dispositivi_elettrici} + q_{imp,T} + q_{apertura_finestre} + q_{irraggiamento} + q_{temp_esterna}$$





Bilancio di massa

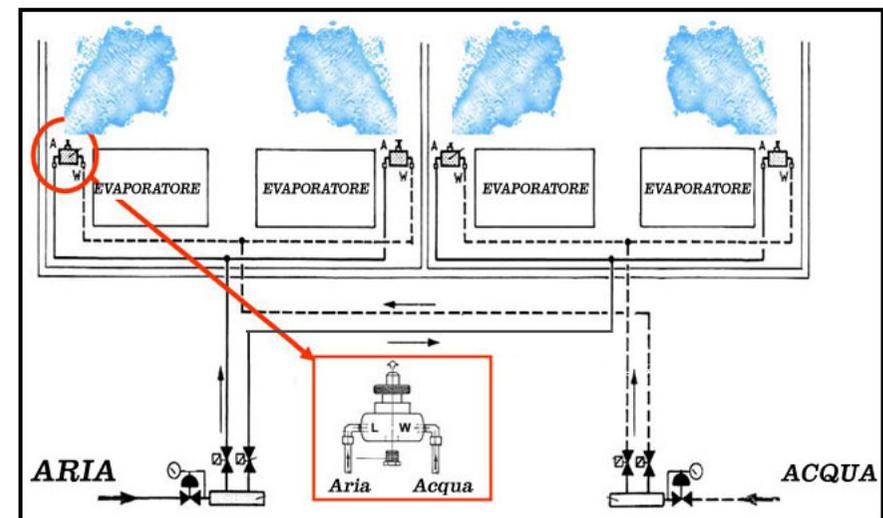
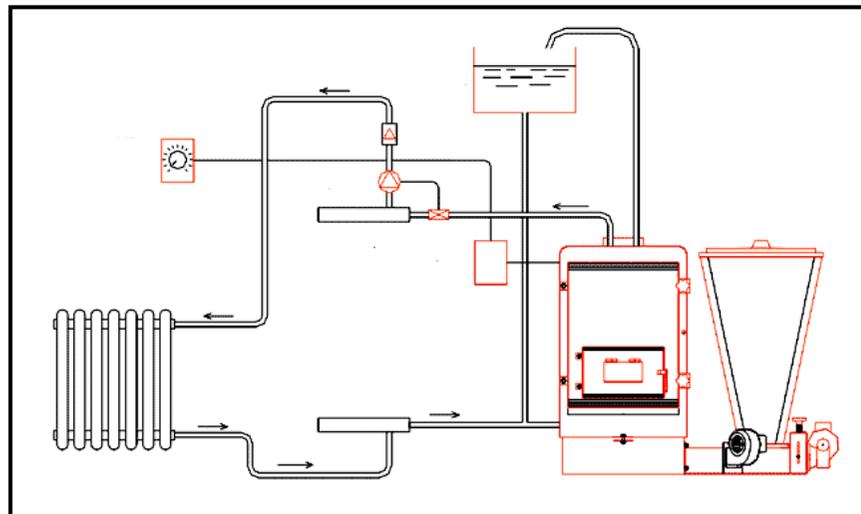
$$w(t+1) = w(t) + w_{\text{persone}}(t) + w_{\text{ambiente_esterno}}(t) + w_{\text{imp},\psi}(t) + w_{\text{condensa}}(t)$$

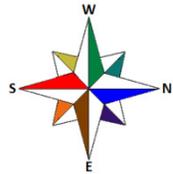




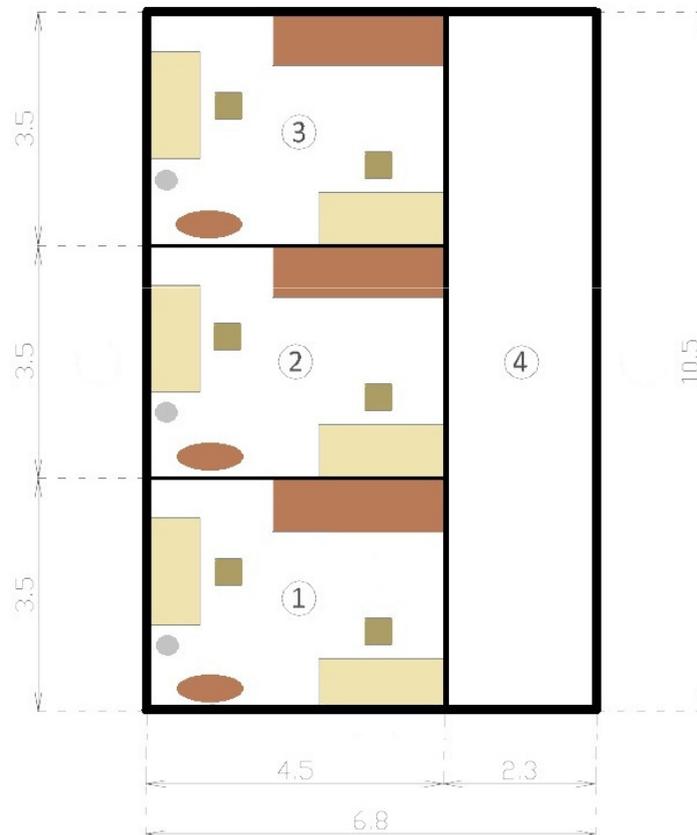
Attuatori di temperatura e umidità

- Indipendenti tra loro
- Dispositivi regolabili separatamente
- Controllabili da remoto
- Transitorio trascurabile

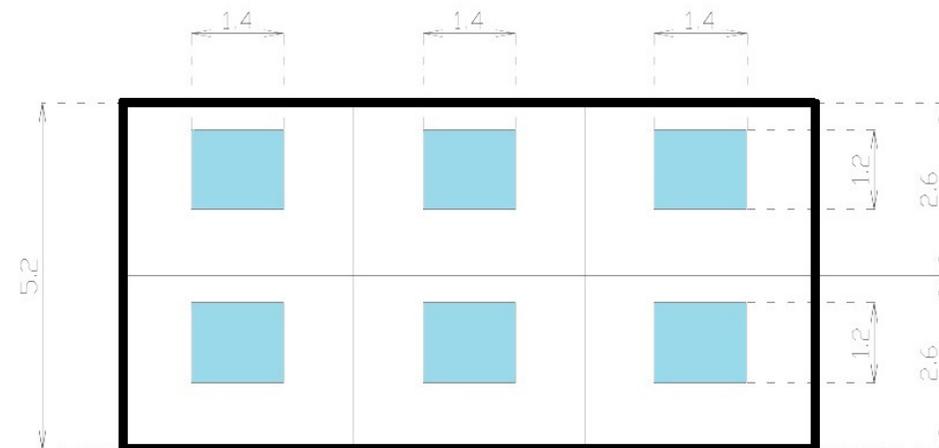




Vista dall'alto



Vista frontale





Vettore di stato

$$x(t) = \begin{bmatrix} T_{a,1}(t) - T_{a,L}(t) \\ \psi_1(t) - \psi_L(t) \\ \vdots \\ T_{a,8}(t) - T_{a,L}(t) \\ \psi_8(t) - \psi_L(t) \end{bmatrix}$$



Punto di lavoro

$$\begin{cases} T_{a,L} = 21.4^\circ\text{C} \\ \psi_L = 9.721 \frac{\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{m}^3} \end{cases}$$

Modello in spazio di stato

$$\begin{cases} x(t+1) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t) + F_{d,i} \cdot d_i(t) + F_{d,e} \cdot d_e(t) \\ y(t) = C \cdot x(t) \end{cases}$$

$$d_i(t) \quad \underline{\underline{\quad}}$$

Disturbi interni

- persone
- dispositivi elettrici
- apertura finestre

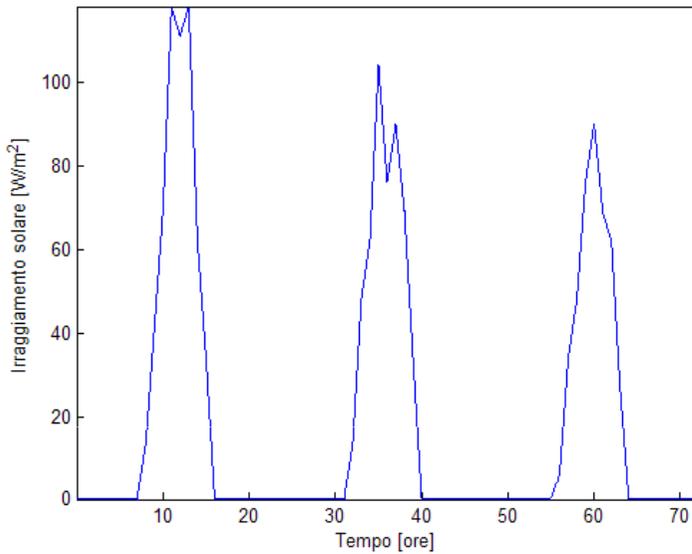
$$d_e(t) \quad \underline{\underline{\quad}}$$

Disturbi esterni

- temperatura esterna
- irraggiamento solare
- umidità esterna



Andamento dell'irraggiamento solare

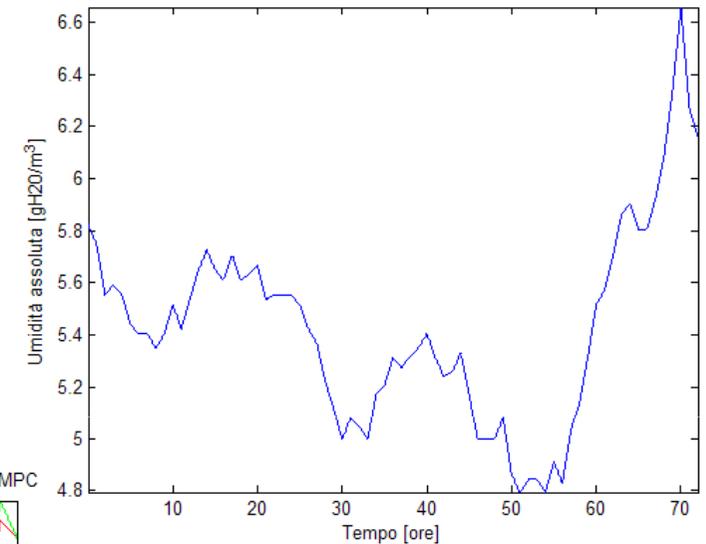


Misurati dalla
stazione di
Legnaro
(provincia di
Padova)

Dati ARPAV

Relativi al centro
meteorologico di
Teolo

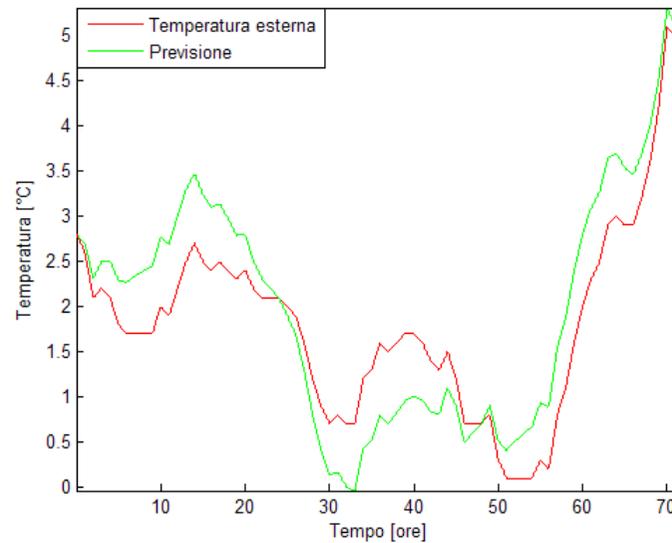
Andamento dell'umidità assoluta esterna



Periodo

Dal
17-1-2011
al
19-1-2011

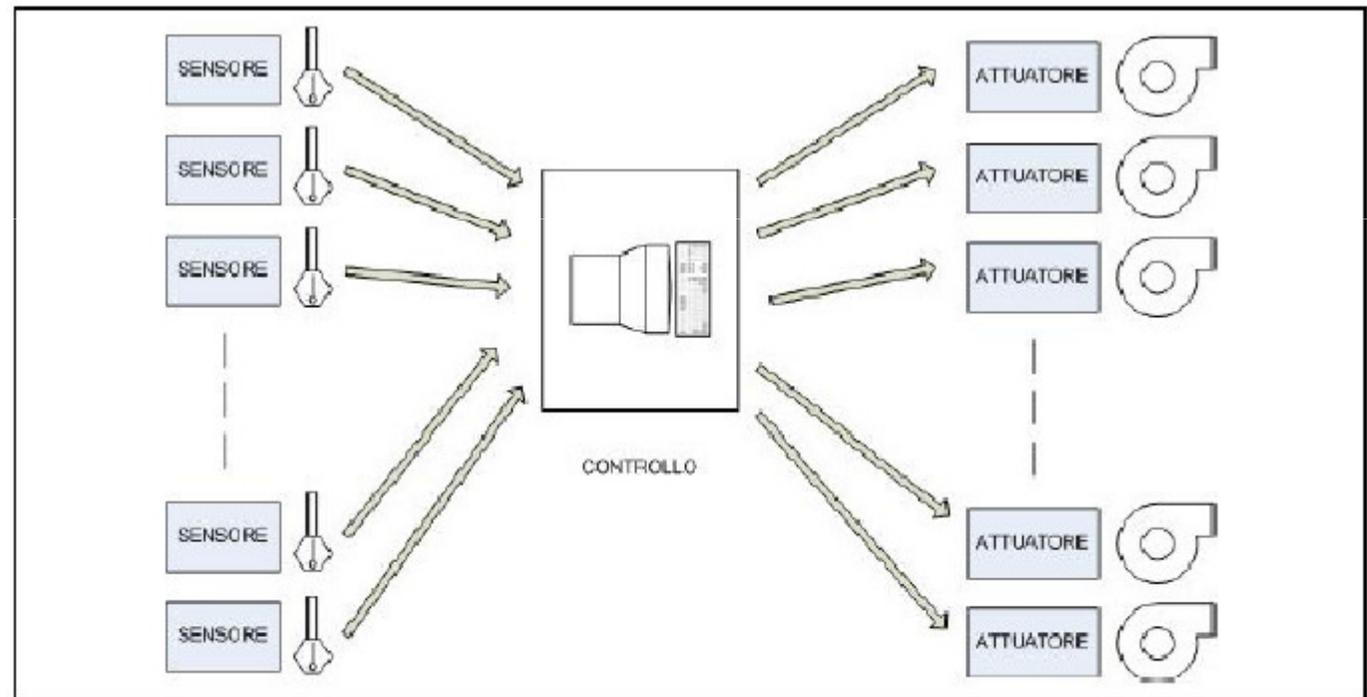
Andamento della temperatura esterna e della previsione fornita ai controllori MPC



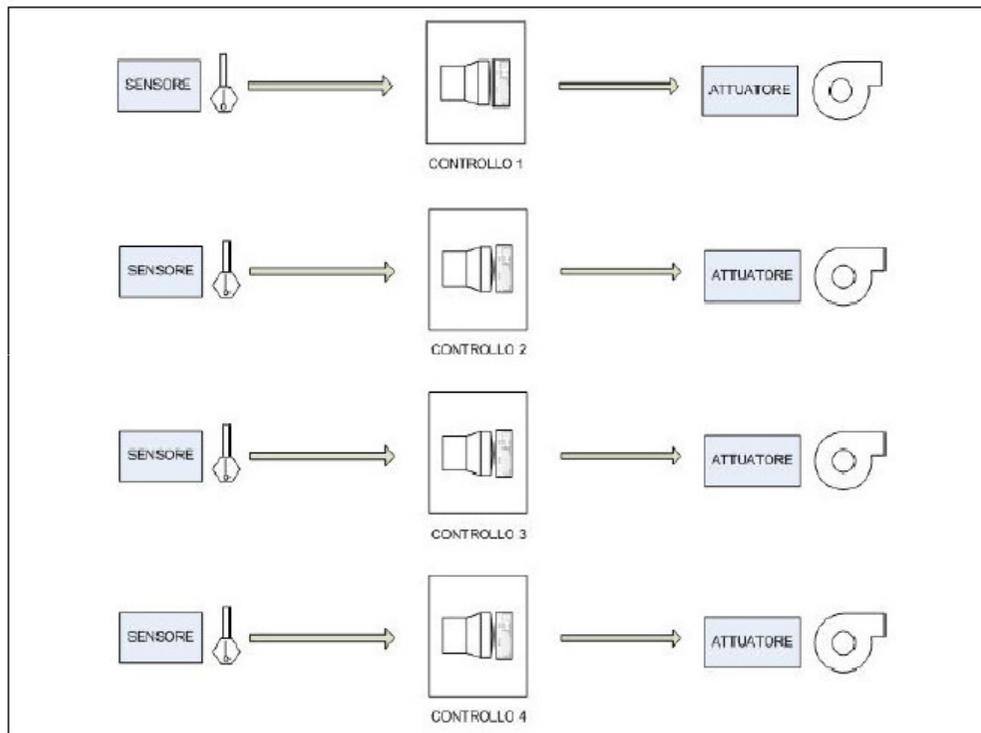


Tipologie di controllo

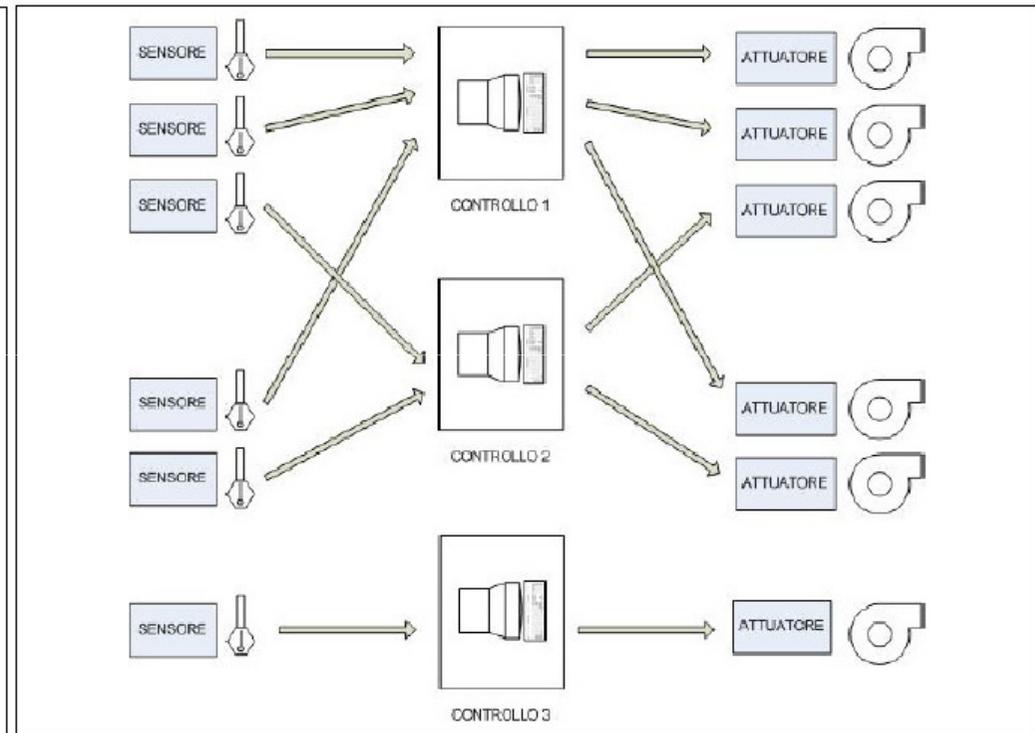
- Controllo centralizzato
- Controllo locale
- Controllo regionale



Controllo centralizzato



Controllo locale



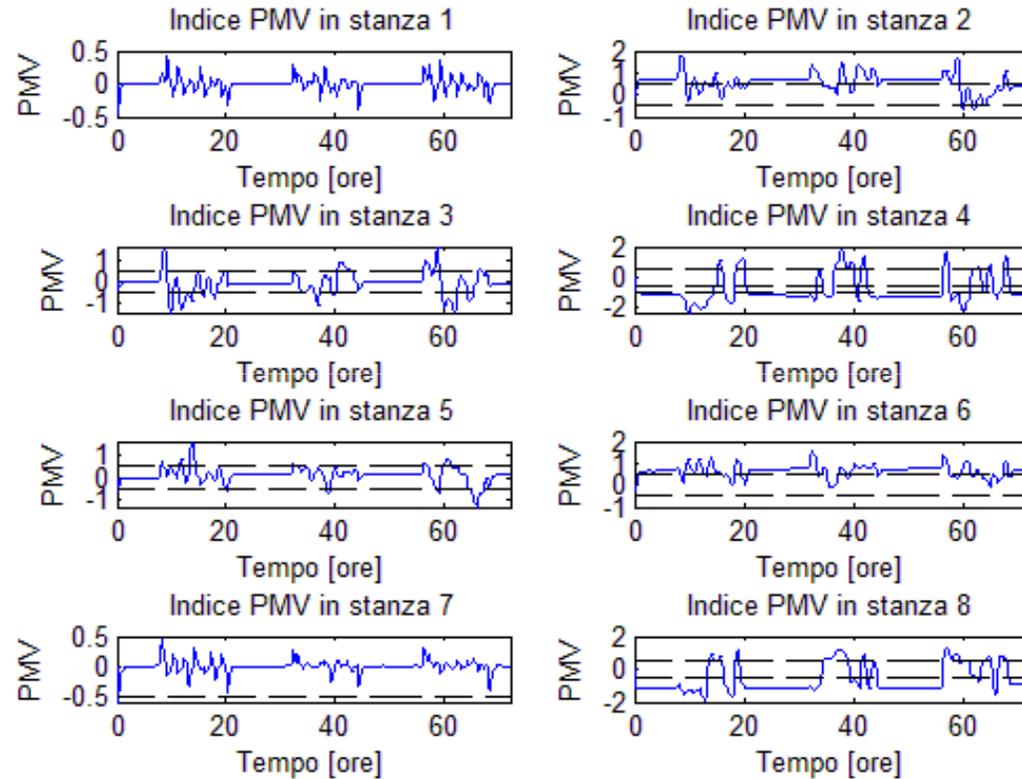
Controllo regionale



Controllo PI

- Necessità di confrontare lo stato dell'arte con i controllori più sofisticati (ottimo, MPC)
- Implementazione di due PI disaccoppiati  - controllo di temperatura
- controllo dell'umidità assoluta
- Tipologia simile al regionale  sensori solo nelle stanze 1 e 7
- Disturbi considerati:
disturbi esterni + presenza di persone, accensione luci, PC, fotocopiatrici
(nella fascia lavorativa 8:00 – 20:00)
- Consumo energetico in 3 giorni pari a 294.5 kWh
(media su 10 simulazioni)

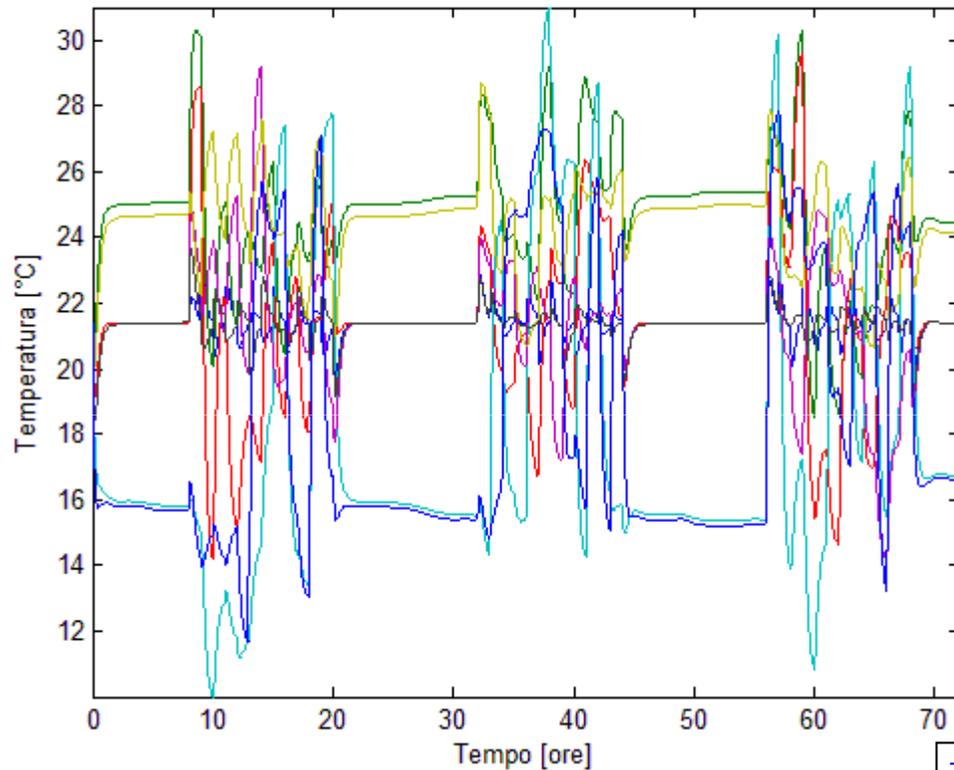




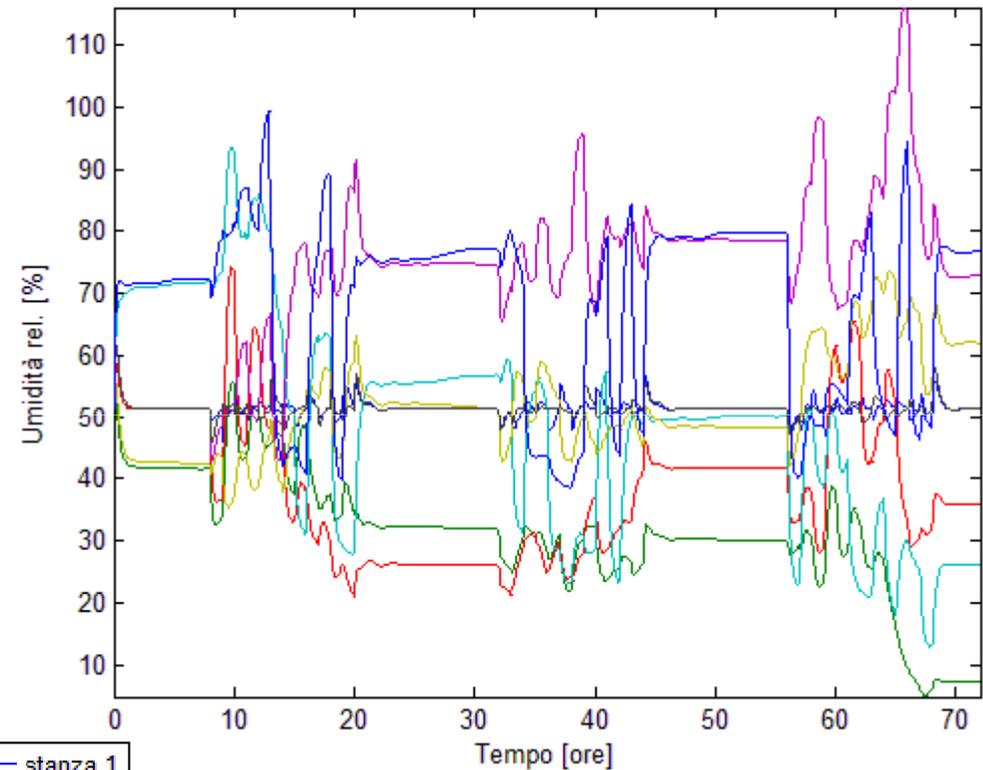
Andamenti del PMV nelle varie stanze



Andamenti delle temperature nelle diverse stanze con controllo PI



Andamenti delle umidità relative nelle diverse stanze con controllo PI



Andamenti delle temperature

Andamenti delle umidità relative

- stanza 1
- stanza 2
- stanza 3
- stanza 4
- stanza 5
- stanza 6
- stanza 7
- stanza 8

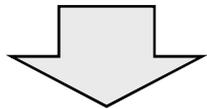


Controllo ottimo a orizzonte infinito LQR

Minimizzazione dell'indice di costo a orizzonte infinito:

$$J = \sum_{t=0}^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)]$$

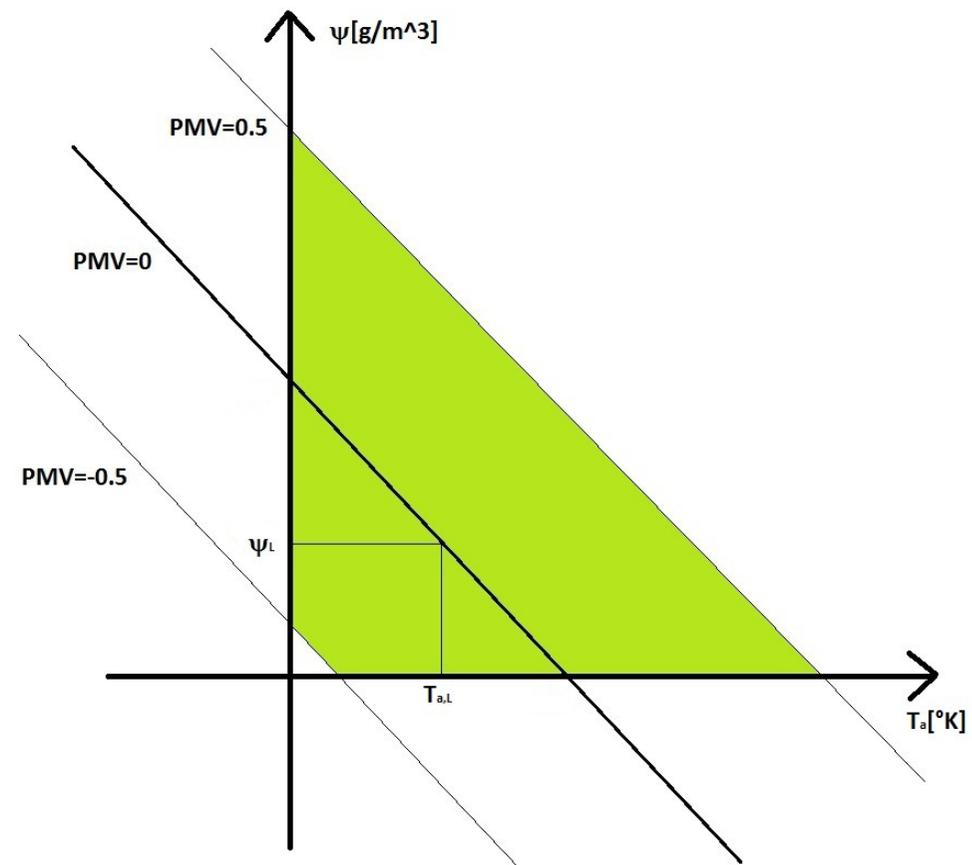
Q pesa gli stati, R pesa gli ingressi



Trade-off tra due obiettivi contrastanti

Determinazione dell'area di lavoro a partire dall'indice PMV:

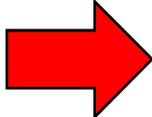
$$PMV = h_1(T_a - T_{a,L}) + h_2(\psi - \psi_L)$$



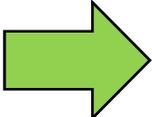


Calcolo delle matrici Q ed R

- Calcolo di Q : $y^T y = x^T C^T C x = x^T Q x \Rightarrow Q = C^T C$
- Calcolo di R : si cerca una forma del tipo γR_0 dove

✓ se $\gamma \rightarrow 0$  controllore aggressivo



✓ se $\gamma \rightarrow \infty$  controllore parsimonioso



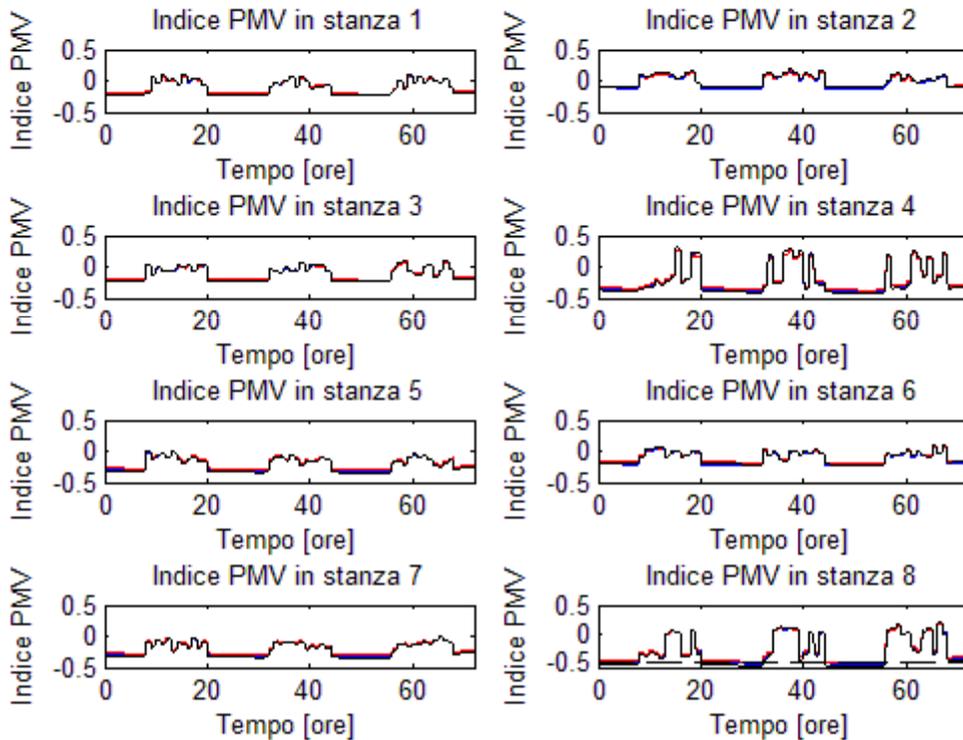
R_0 ha forma diagonale, del tipo:
$$\begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \frac{1}{\alpha} \end{bmatrix}$$

con $\alpha < 1$ (azione maggiore sull'attuatore di temperatura).

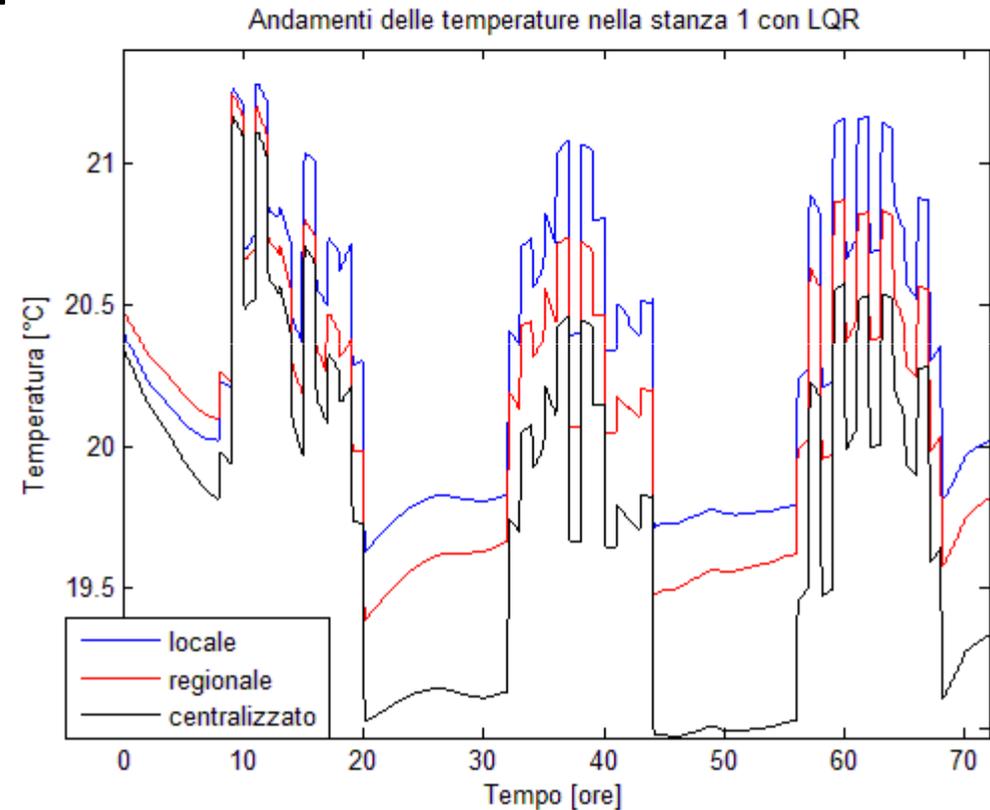


Risultati con controllo ottimo a orizzonte infinito LQR

1/2



Confronto degli andamenti del PMV nelle varie stanze con LQR



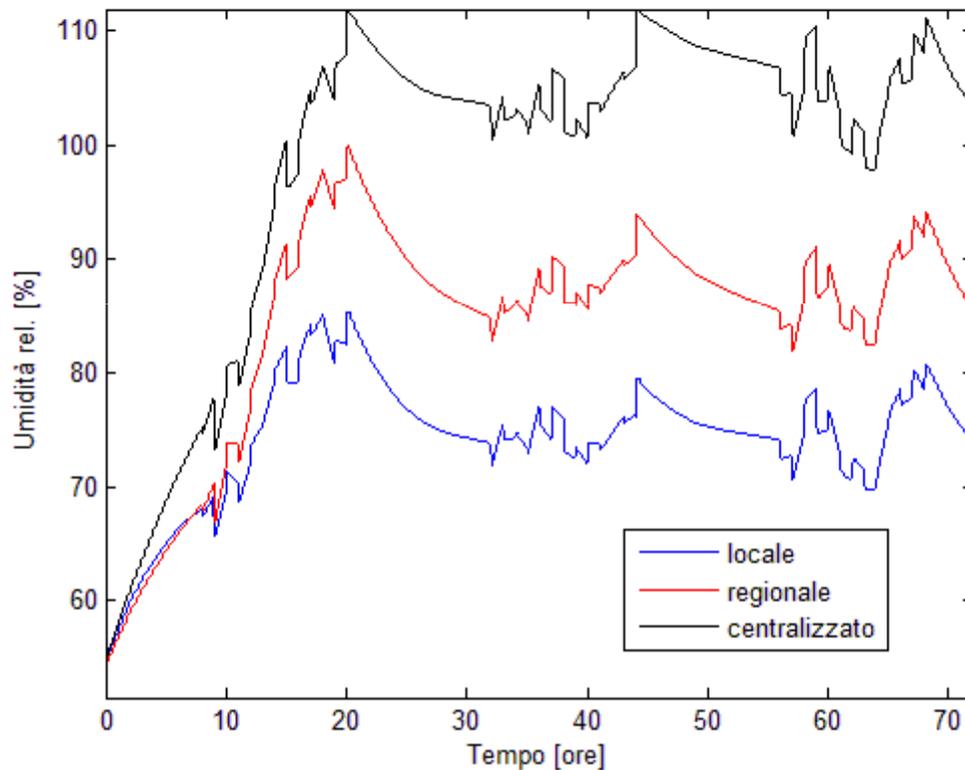
Confronto degli andamenti delle temperature nella stanza 1 con LQR



Risultati con controllo ottimo a orizzonte infinito LQR

2/2

Andamenti delle umidità relative nella stanza 1 con LQR



Confronto degli andamenti delle umidità relative nella stanza 1 con LQR

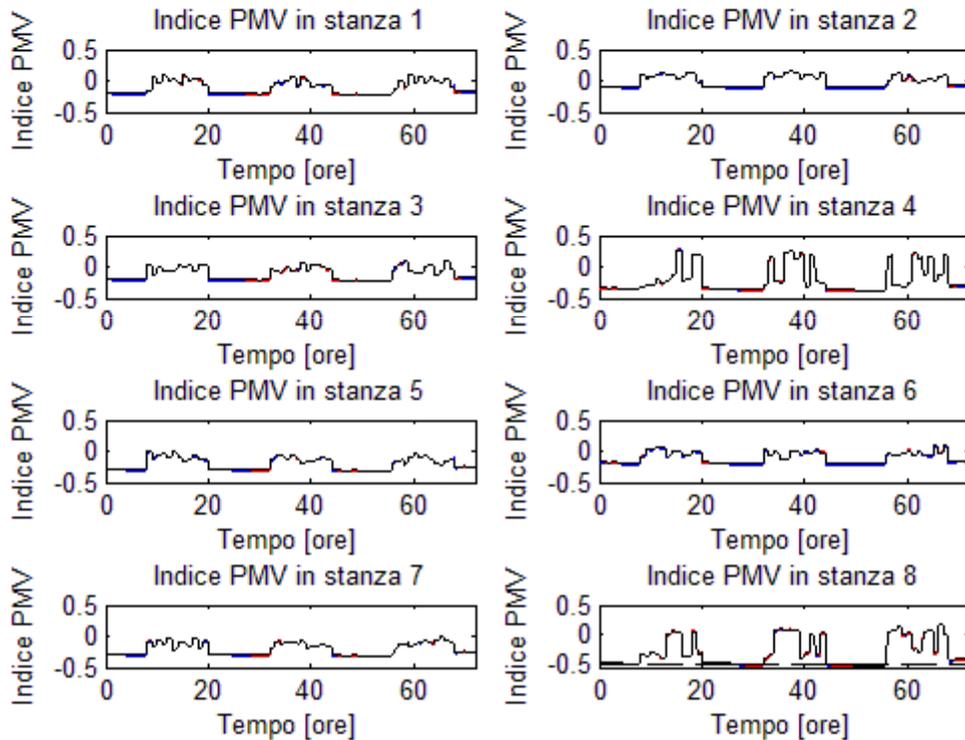
Confronto delle energie espresse in kWh			
	C. locale	C. regionale	C. centralizzato
Energia	308.9	308.0	301.3

- Risparmio annuo tra il locale ed il centralizzato di circa 930 kWh, equivalente a 220 € (media su 10 simulazioni)
- Poca differenza dalle ipotesi fatte sul modello
- Andamenti scadenti delle (temperature ed) umidità dovuti all'approccio di controllo
- Possibile soluzione: controllo indipendente degli stati ($Q = I$)

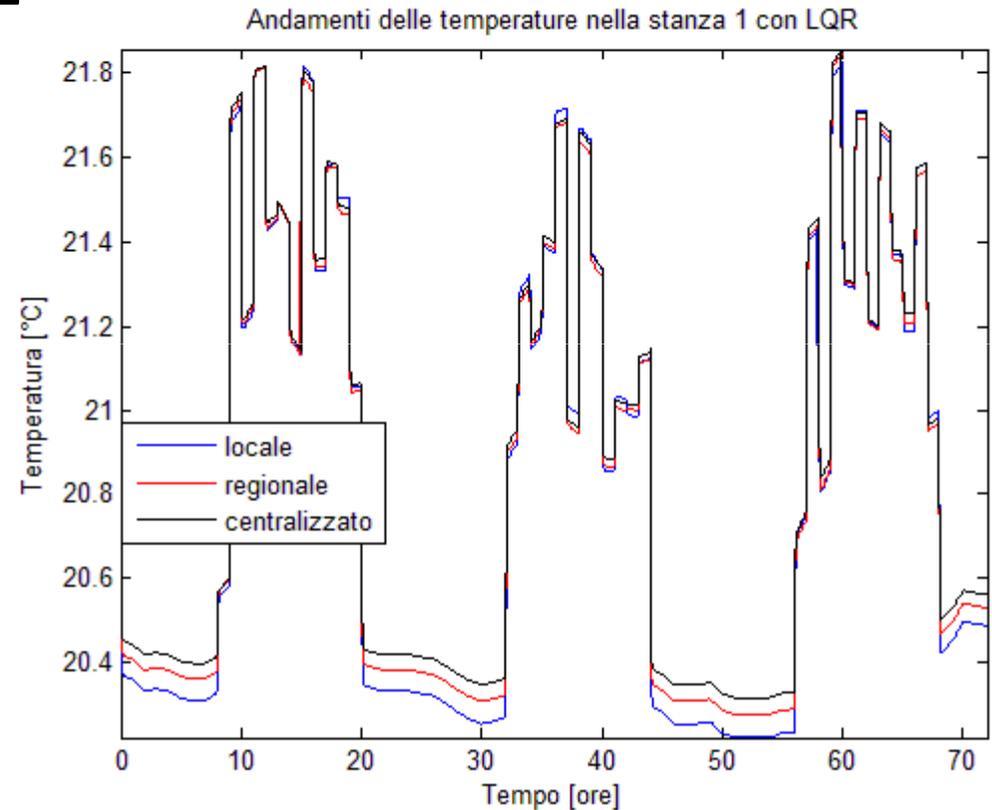




Risultati con controllo ottimo LQR con controllo degli stati 1/2



Confronto degli andamenti del PMV nelle varie stanze con LQR (controllo degli stati)



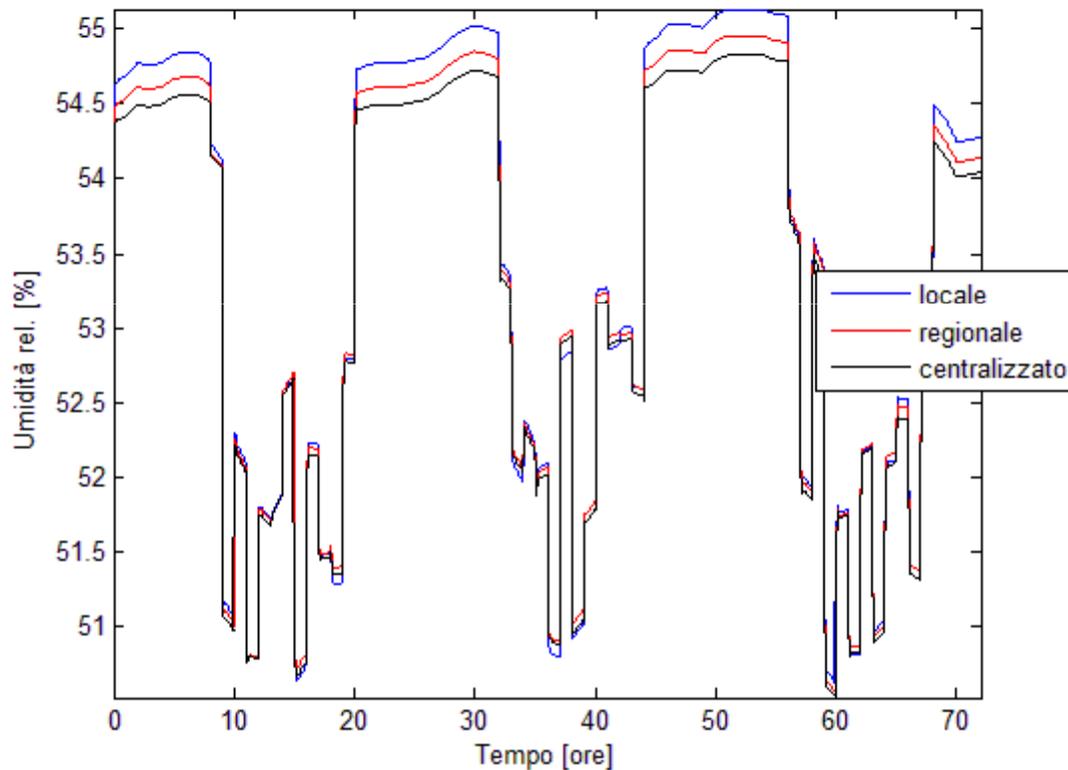
Confronto degli andamenti delle temperature nella stanza 1 con LQR (controllo degli stati)



Risultati con controllo ottimo LQR con controllo degli stati

2/2

Andamenti delle umidità relative nella stanza 1 con LQR

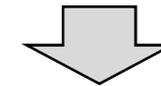


Confronto degli andamenti delle umidità relative nella stanza 1 con LQR (controllo degli stati)

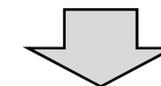
Confronto delle energie espresse in kWh			
	C. locale	C. regionale	C. centralizzato
Energia	313.8	314.3	314.7

Verifica dell'effettiva differenza tra le tipologie di controllo:

- Divisorio tra le stanze 100 volte più spesso
- Divisorio con il corridoio 10 volte più spesso



Confronto delle energie espresse in kWh			
	C. locale	C. regionale	C. centralizzato
Energia	314.0	300.7	300.3



Risparmio di 403 € all'anno, a parità di PMV



Risultati con controllo ottimo LQR con controllo degli stati e spegnimento notturno + all'apertura delle finestre

- Fascia oraria di funzionamento dalle 7:00 alle 20:00

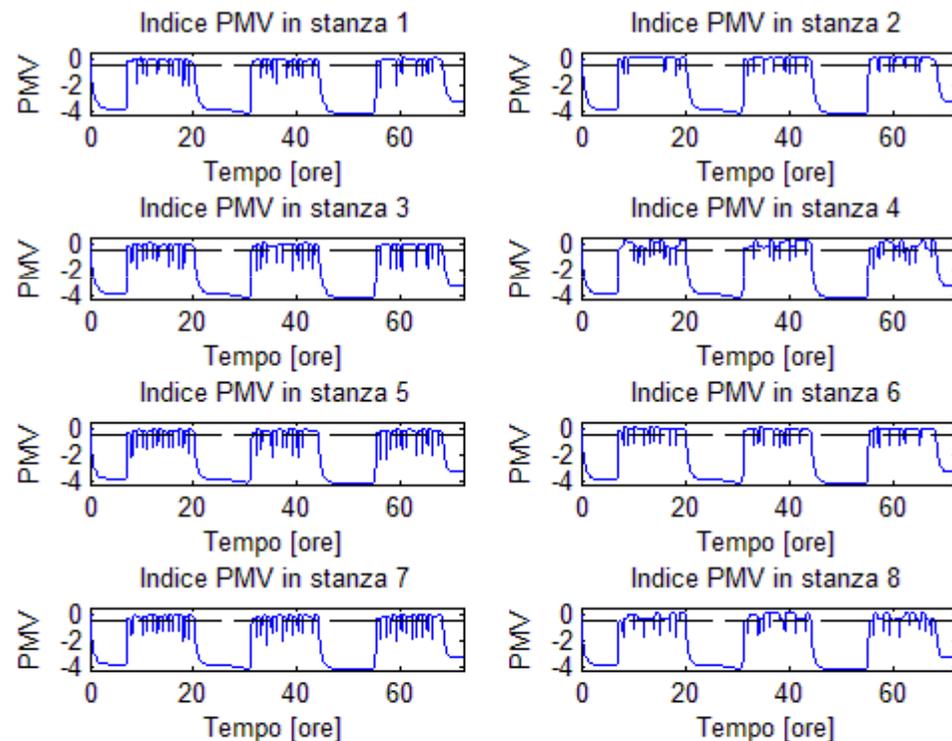
- Risparmio di 2160 € all'anno rispetto al caso precedente (riferimento al regionale)



- Sconsigliabile perché crea situazioni estreme



- In pratica ci si aspettano andamenti migliori



Confronto degli andamenti del PMV nelle varie stanze con LQR e spegnimenti notturni + finestre



Controllo predittivo MPC – Cenni teorici

- Modello di predizione

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + F_T T_e(t)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

- Indice di costo

$$J(t) = \sum_{k=1}^{N_P} \|y(t+k|t) - r(t+k)\|_Q^2 + \sum_{k=1}^{N_U} \|\Delta u(t+k-1|t)\|_R^2$$

N_P ... orizzonte di predizione

N_U ... orizzonte di controllo

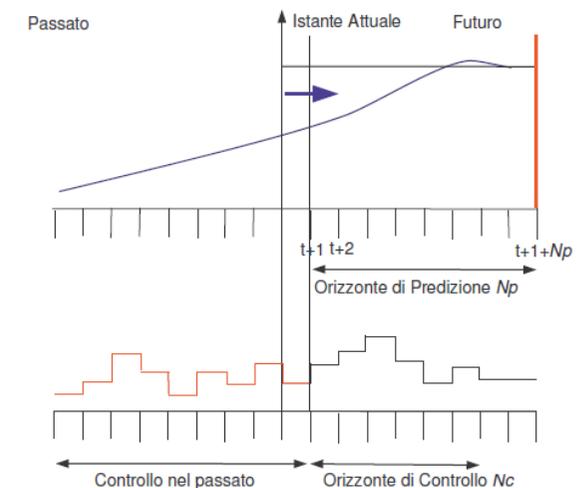
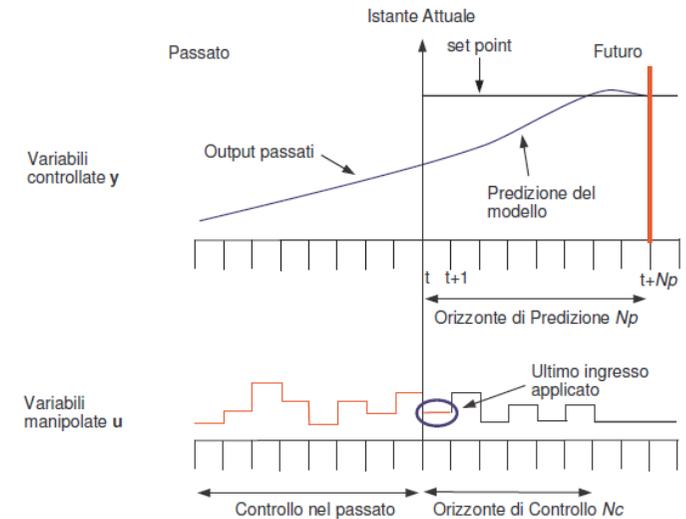


Legge di controllo

1. Misurazione di $x(t)$ e di $y(t)$ all'istante t
2. Calcolo degli incrementi ottimi Δu
3. Applicazione del primo incremento $\Delta u(t/t)$
4. Passaggio all'istante $t+1$

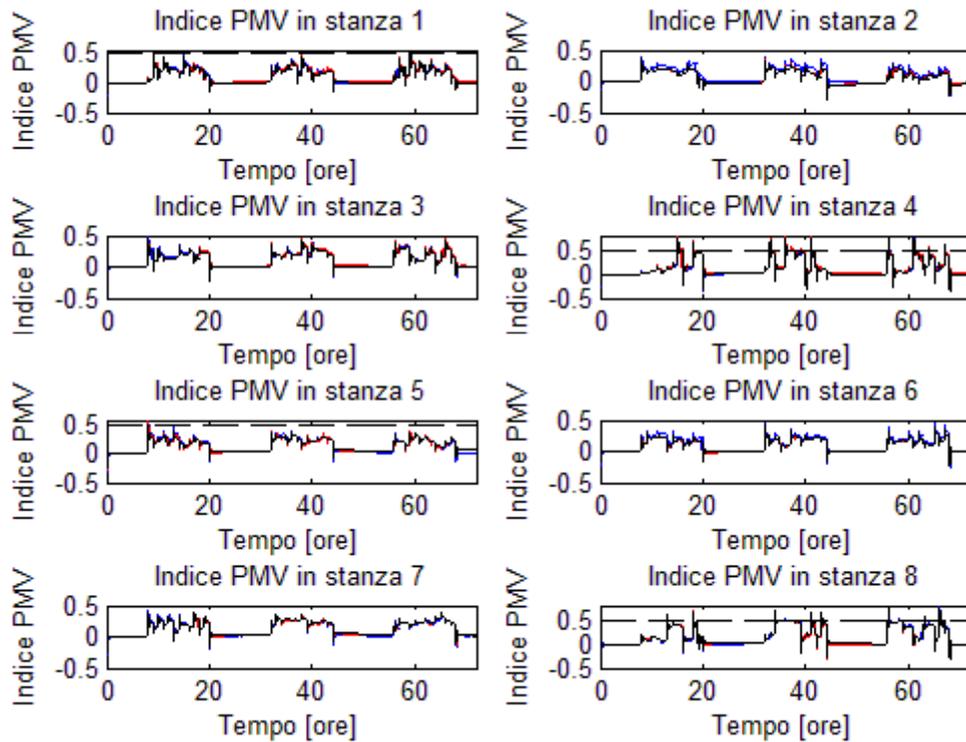
Dati di progetto

- Tempo di campionamento 150 secondi
- $N_P = 200$ (ca. 8 ore)
- $N_U = 20$

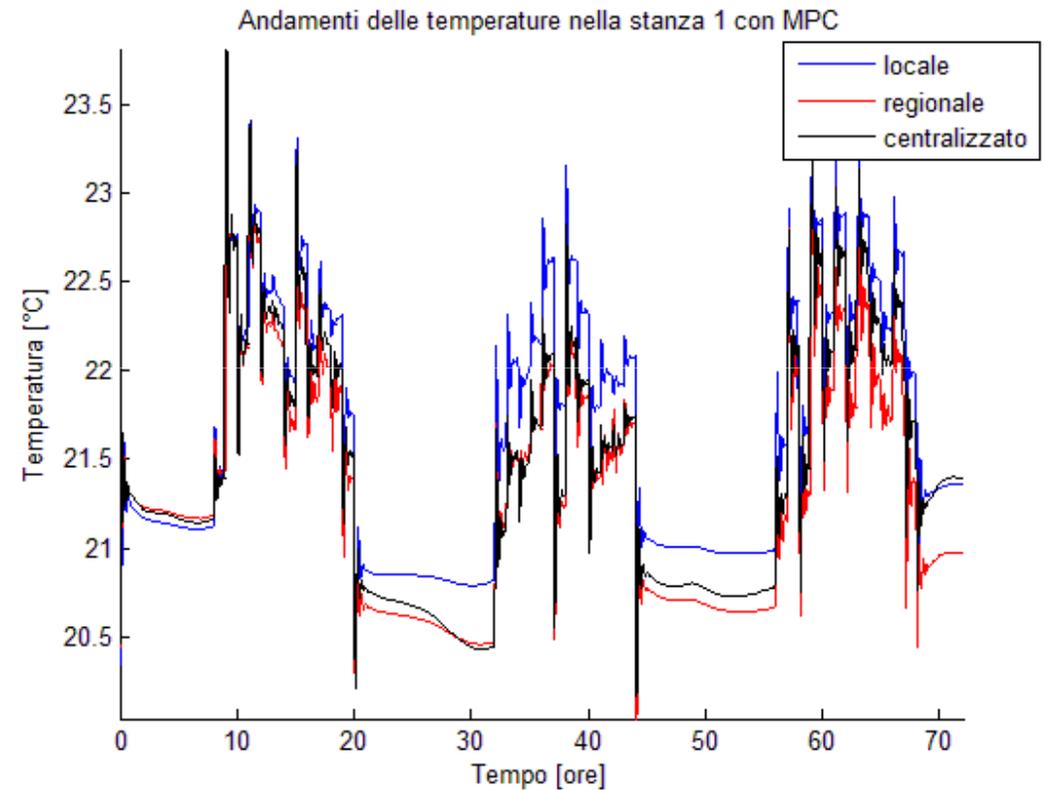




Risultati delle simulazioni



Andamenti del PMV nelle varie stanze con MPC

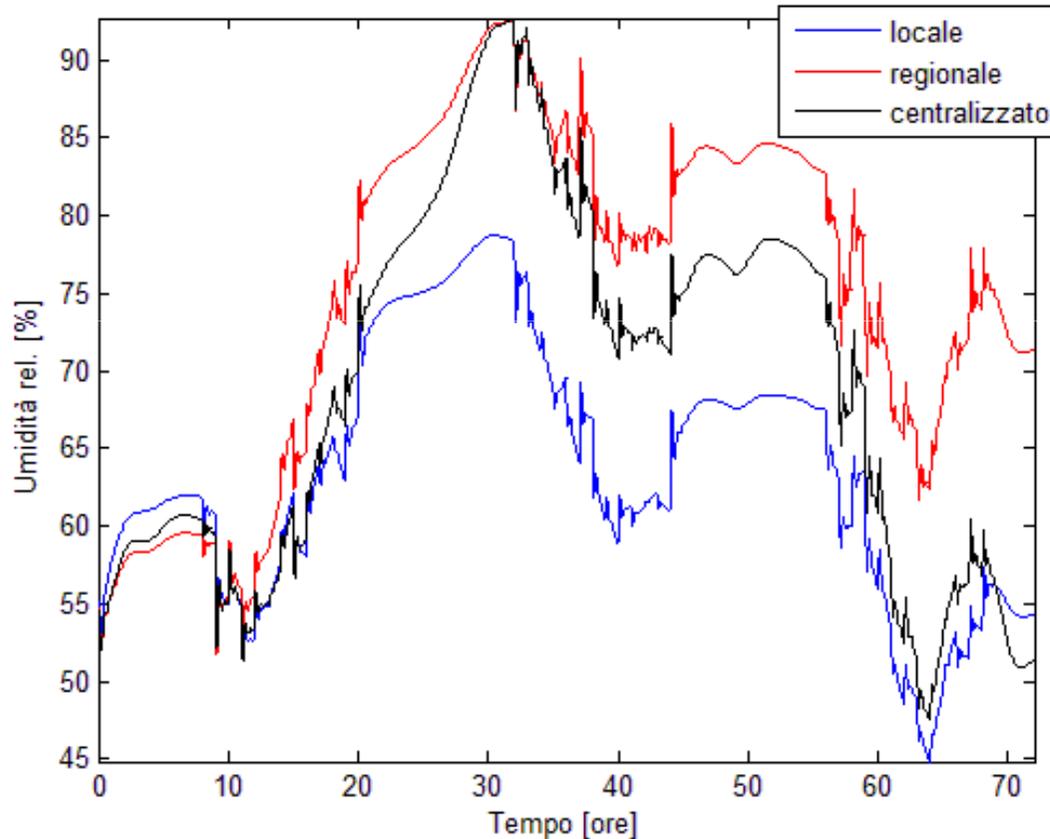


Andamenti delle temperature nella stanza 1



Risultati delle simulazioni

Andamenti delle umidità relative nella stanza 1 con MPC



Andamenti delle umidità nella stanza 1 con MPC

Confronto delle energie espresse in kWh			
	C. locale	C. regionale	C. centralizzato
Energia	338.3	338.1	338.0

Confronto delle energie consumate in 3 giorni nelle varie tipologie con MPC

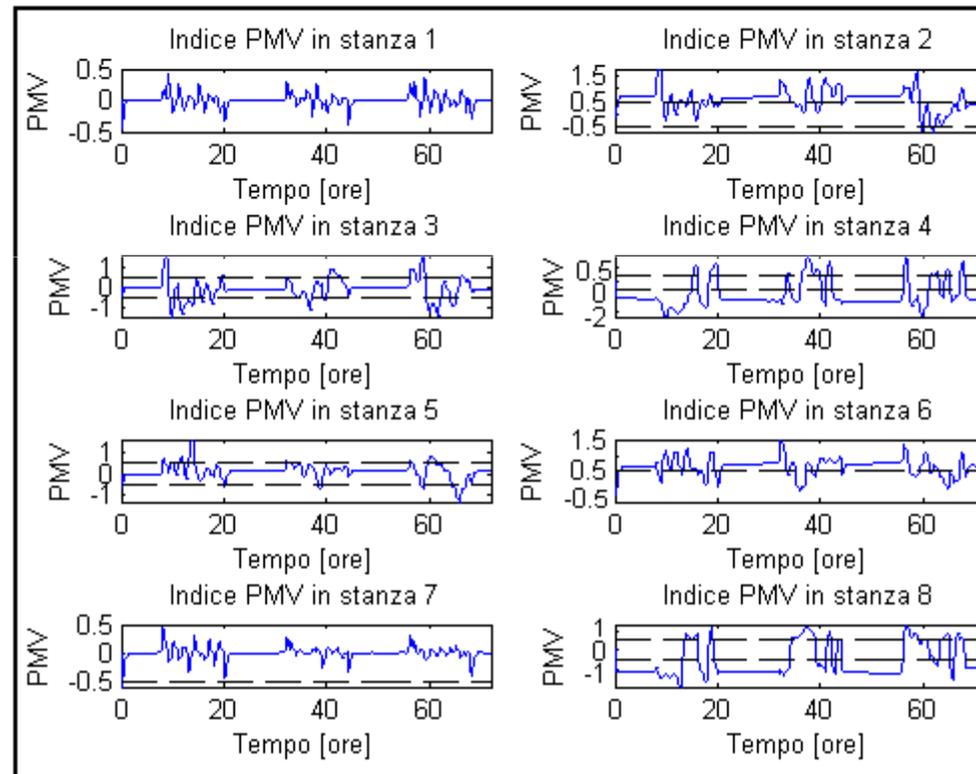
Conclusioni:

Nemmeno nel caso del controllo MPC si ottengono sostanziali differenze tra le tipologie di controllo locale, regionale e centralizzato.



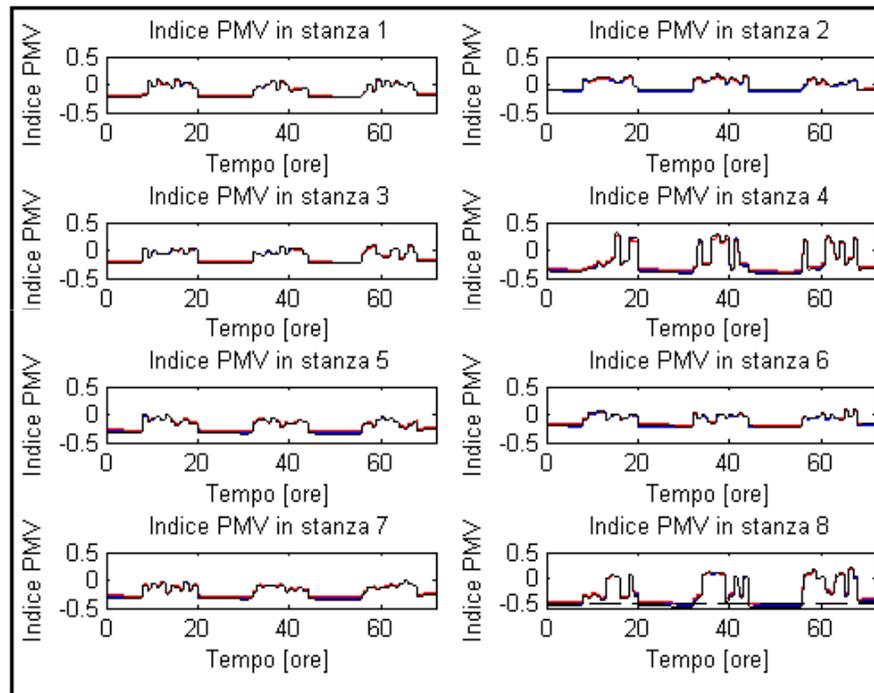
Confronti finali

Controllo PI

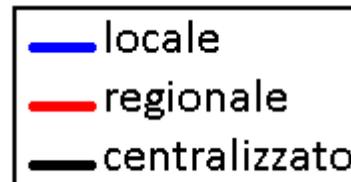
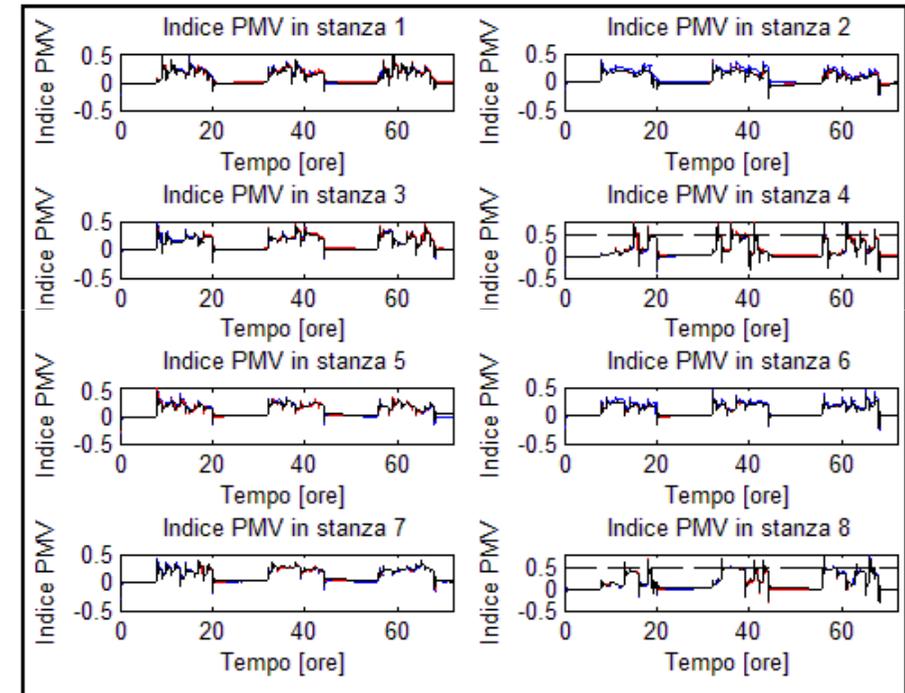




Controllo LQR



Controllo MPC



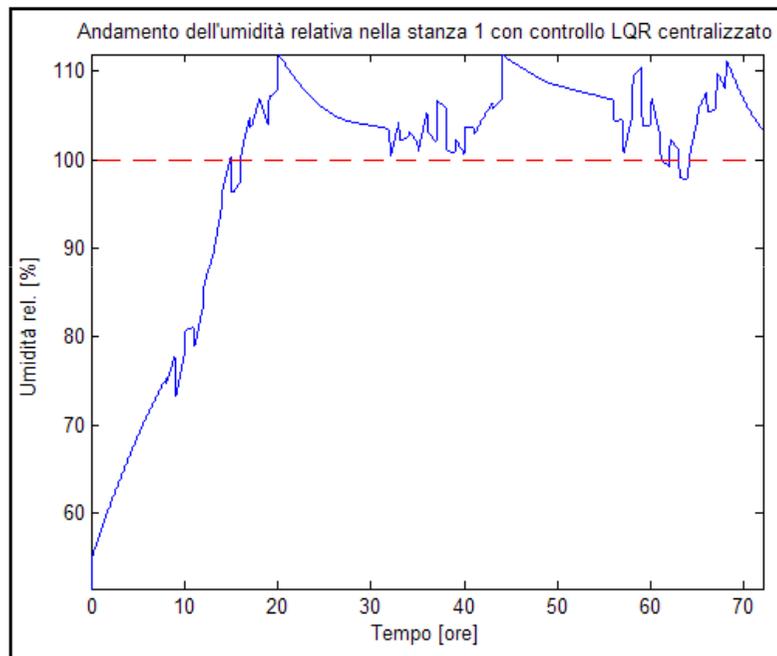


Confronto delle energie espresse in kWh			
	C. locale	C. regionale	C. centralizzato
PI	/	294.5	/
LQR	308.9	308.0	301.3
LQR stati	313.8	314.3	314.7
MPC	338.3	338.1	338.0

Media su 10 simulazioni dell'energia consumata in tre giorni lavorativi



Situazioni critiche di umidità





Risultati

- LQR preferibile all'MPC
 - risultati migliori in termini di comfort
 - risultati migliori in termini di risparmio energetico
 - computazionalmente meno oneroso
- Tipologia di controllo: si promuove il locale
 - semplicità implementativa
 - onere computazionale ridotto
 - maggiore robustezza



Suggerimenti per sviluppi futuri

- controllare il PMV nella sua forma originale
- raffinare il modello considerando
 - l'accumulo termico dei muri
 - l'apertura delle porte
 - il fenomeno della condensa
 - l'assorbimento del vapore acqueo delle superfici interne
- realizzare un algoritmo che costruisce automaticamente il modello in spazio di stato
- modellizzazione degli attuatori
 - transitori
 - l'influenza del raffreddamento sull'umidità
- raffinare il controllo predittivo
- estendere il concetto di comfort considerando anche il livello di anidride carbonica



FINE

Grazie per l'attenzione!