

Hybrid heat pump-gas boiler generators for heating applications

An integrated framework for optimal sizing, control and energy flexibility potential assessment

Allievo:

Francesco D'Ettorre

francesco.dettorre@ing.unipi.it

Supervisors:

Prof. Daniele Testi, Prof. Walter Grassi

Corso di dottorato in Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni
XXXII ciclo

13 novembre 2019



Sistemi ibridi Caldaia/Pompa di calore

Definizione

Sistema ibrido: Pompa di calore + Caldaia

Capacità di sfruttare le sinergie tra i due generatori:

- fuel-switching;
- incremento delle performance;
- buone performance anche con sistemi di emissione ad alta temperatura;
- minore impatto sulla rete;
- flessibilità energetica.

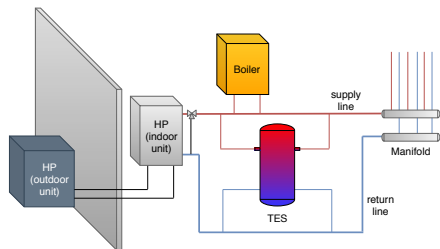


Figura: Sistema ibrido.

Stato dell'arte & Research gaps

L'analisi della letteratura mostra tre principali aree di ricerca:

- Analisi dei benefit economico-ambientali derivanti dall'utilizzo della tecnologia ibrida;
- Investigazione di strategie di controllo ottimali;
- Applicazione di sistemi ibridi per servizi di Demand-Side Management (Energy Flexibility).

Research gaps:

- integrazione di strategie di controllo e dimensionamento ottimali;
- identificazione di linee guida progettuali;
- analisi dell'impatto di una capacità di accumulo termico sulla strategia di fuel-switching e sul design di sistemi di controllo predittivi;
- criteri di valutazione del potenziale di energy flexibility di sistemi ibridi accoppiati ad accumulo termico.

Lavoro 1: Obiettivi & Research questions

Obiettivo

Sviluppo di una metodologia integrata per il controllo ed il dimensionamento ottimale di sistemi ibridi caldaia/pompa di calore.

Research questions

Qual è l'impatto di una strategia di controllo ottimizzata sul dimensionamento ottimo di sistemi ibridi?

É possibile identificare, sulla base di tale metodologia, linee guida progettuali?

Può un utente beneficiare in termini di costi di investimento e costi operativi dall'applicazione di tale strategia?

Metodologia

Decomposizione del problema su due livelli.

1° livello: Simulazione dinamica

Simulazione dinamica del sistema edificio-impianto → Identificazione della domanda termica al sistema di generazione per soddisfare le condizioni di comfort richieste su tutto il periodo di riscaldamento.



2° livello: Ottimizzazione del sistema ibrido

- Ottimizzazione della **strategia di controllo** → Identificazione della ripartizione ottimale della domanda tra i due generatori: Caldaia – Pompa di calore;
- Ottimizzazione del **dimensionamento** dei due generatori.

Descrizione del sistema ibrido

Strategie di controllo

- Alternativa: Pompa di calore o Boiler;
- Simultanea: Pompa di calore e Boiler;

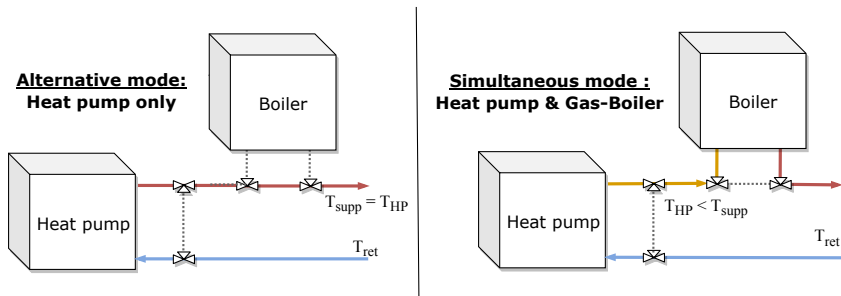


Figura: Modalità di funzionamento.

Lavoro focalizzato sul sistema ibrido \Rightarrow assenza di **accumulo termico**.

Modellazione della pompa di calore

Procedura

- 1 Identificazione di una macchina di riferimento;
- 2 Adimensionalizzazione delle performance;
- 3 applicazione fattore di scala per scalare le performance adimensionali in funzione della taglia (performance nominali) della macchina in esame;
- 4 correzione delle performance in funzione del fattore di carico e del defrost.

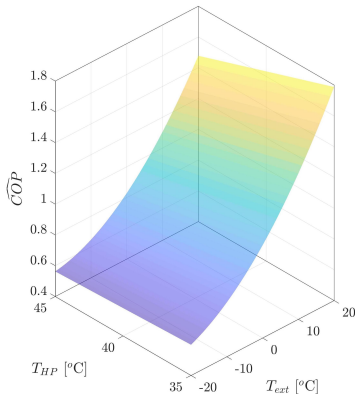


Figura: Mappa COP adimensionale.

Strategia integrata per il controllo ed dimensionamento ottimi

Livello esterno – Dimensionamento ottimo

Identificare il range di taglie di PdC da investigare (S_{HP}):

$$S_{HP} = \dot{Q}_{HP,nom}^1, \dot{Q}_{HP,nom}^2, \dots, \dot{Q}_{HP,nom}^i, \dots, \dot{Q}_{HP,nom}^s$$



Livello interno – Controllo ottimo

Per ogni taglia $\dot{Q}_{HP,nom}^i$ simula il funzionamento del sistema ibrido su tutta la stagione di riscaldamento implementa strategie di controllo ottimizzate:

Funzionamento Alternativo $\Rightarrow COP_{eq} = p_{el}/p_{gas} \cdot \eta_B$

Funzionamento Simultaneo $\Rightarrow T_{HP} \in [T_{ret}, T_{supp}]$ tale da minimizzare i costi operativi.

Calcolo del valore attuale netto (NPV) dei flussi di cassa su una vita utile dell'impianto di 20 anni e identificazione del dimensionamento che massimizza il NPV (funzione obiettivo).

Caso studio

L'edificio dell'Università di Pisa noto come “Palazzo Venera” è stato preso come riferimento sul quale applicare la metodologia di seguito proposta.

Caratteristiche

- Generazione: Boiler 230 kW
- Emissione: Fan-coils
($T_{supp} = 45^{\circ}C$)
- Domanda di picco: 180 kW
- Volume riscaldato: 8238 m^3



Figura: Palazzo Venera.

Caso studio

Si è ipotizzato un intervento di riqualificazione dell'impianto consistente nella sostituzione della caldaia (scenario di riferimento) con un sistema ibrido.

Al fine di generalizzare i risultati dell'analisi, sono stati presi in considerazione differenti scenari:

Scenario Base

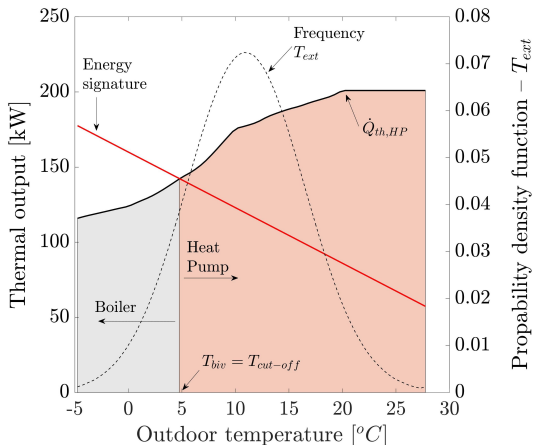
- zona climatica D (Pisa)
- $p_{el} = 0.183 \text{ €/kWh}$,
 $p_{el}/p_{gas} = 3.5$

Analisi sensitività

- clima: zona C (Bari), zona E (Milano)
- scenario economico:
 $\pm 20\% p_{el}$ scenario base.

Impatto della strategia di controllo sul dimensionamento ottimo (scenario base).

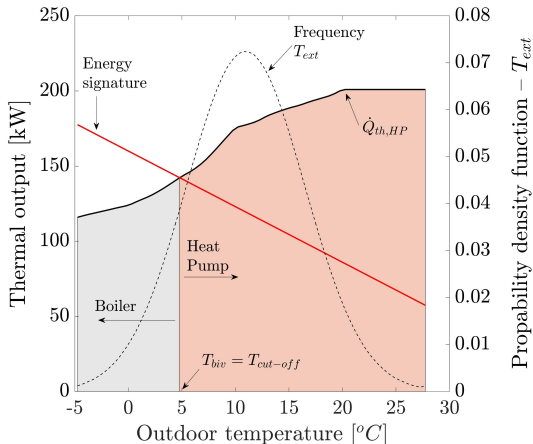
Funzionamento **alternativo**



- T_{biv} → trade-off tra $T_{ext}^{min} = -5^{\circ}C$ e la temperatura esterna più frequente $T_{ext} = 10^{\circ}C$

Impatto della strategia di controllo sul dimensionamento ottimo (scenario base).

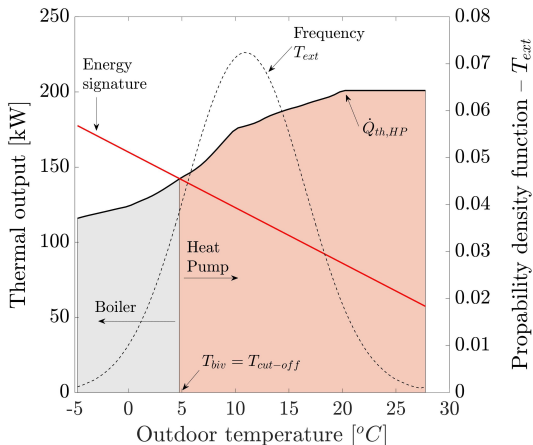
Funzionamento **alternativo**



- $T_{biv} \rightarrow$ trade-off tra $T_{ext}^{min} = -5^{\circ}C$ e la temperatura esterna più frequente $T_{ext} = 10^{\circ}C$
- $T_{biv} \rightarrow -5^{\circ}C$:
+ estensione campo funzionamento PdC
- incremento funzionamento a carico parziale

Impatto della strategia di controllo sul dimensionamento ottimo (scenario base).

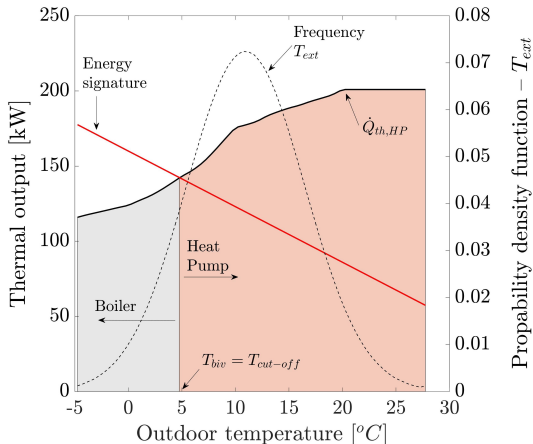
Funzionamento **alternativo**



- $T_{biv} \rightarrow$ trade-off tra $T_{ext}^{min} = -5^{\circ}C$ e la temperatura esterna più frequente $T_{ext} = 10^{\circ}C$
- $T_{biv} \rightarrow -5^{\circ}C$:
+ estensione campo funzionamento PdC
- incremento funzionamento a carico parziale
- $T_{biv} \rightarrow 10^{\circ}C$:
- riduzione campo funzionamento PdC
+ incremento funzionamento in condizioni prossime a quelle nominali

Impatto della strategia di controllo sul dimensionamento ottimo (scenario base).

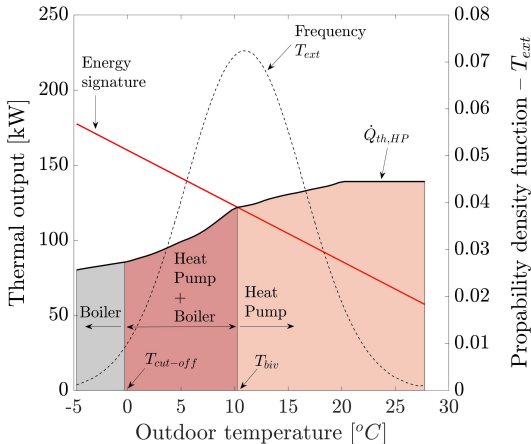
Funzionamento **alternativo**



- Taglia ottima PdC: 130 kW
- Taglia ottima Caldaia: 175 kW
- Load share PdC: 75%
- Load share Caldaia: 25%
- Operational cost-saving: 36.5%
- Saving energia primaria: 38%
- NPV: 37.7 k €
- PBP: 12 anni

Impatto della strategia di controllo sul dimensionamento ottimo (scenario base).

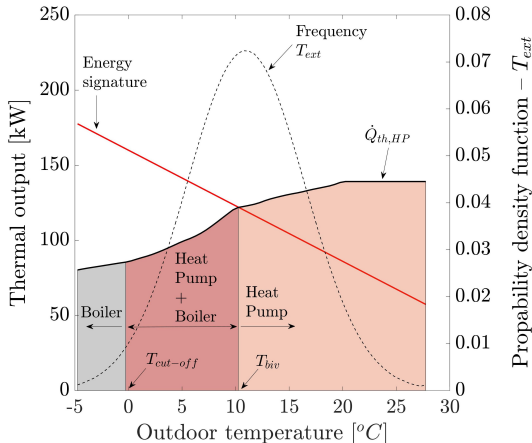
Funzionamento **simultaneo**



- T_{biv} → in corrispondenza della temperatura esterna più frequente ($T_{ext} = 10^{\circ}C$)

Impatto della strategia di controllo sul dimensionamento ottimo (scenario base).

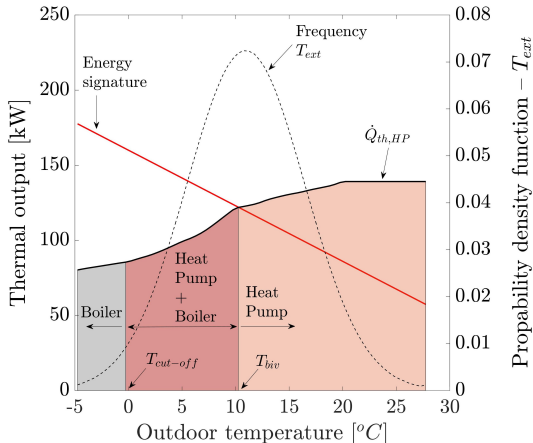
Funzionamento **simultaneo**



- $T_{biv} \rightarrow$ in corrispondenza della temperatura esterna più frequente ($T_{ext} = 10^{\circ}C$)
- Funzionamento simultaneo per il 10% delle ore di funzionamento dell'impianto

Impatto della strategia di controllo sul dimensionamento ottimo (scenario base).

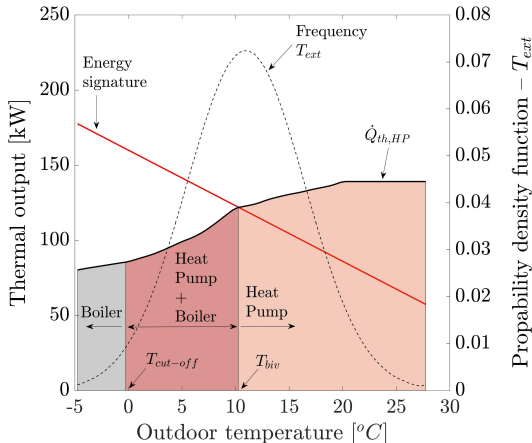
Funzionamento **simultaneo**



- T_{biv} → in corrispondenza della temperatura esterna più frequente ($T_{ext} = 10^{\circ}C$)
- Funzionamento simultaneo per il 10% delle ore di funzionamento dell'impianto
- PdC copre 80-90% del ΔT tra mandata e ritorno ($\sim 5^{\circ}C$)

Impatto della strategia di controllo sul dimensionamento ottimo (scenario base).

Funzionamento **simultaneo**



- Taglia ottima PdC: 90 kW
- Taglia ottima Caldaia: 175 kW
- Load share PdC: 80%
- Operational cost-saving: 40%
- Saving energia primaria: 42%
- NPV: 58.8 k €
- PBP: 9 anni

Impatto del dimensionamento ottimo sui consumi di energia primaria (Scenario base).

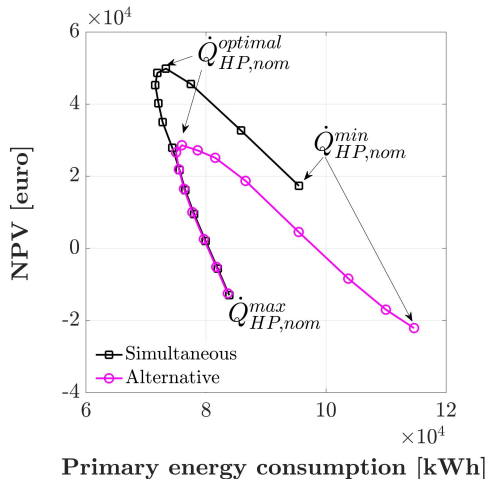


Figura: NPV vs consumi di energia primaria in funzione della taglia della PdC.

L'ottimo economico minimizza, tra gli scenari di dimensionamento considerati, anche i consumi di energia primaria.

Analisi di sensitività al prezzo dell'energia elettrica.

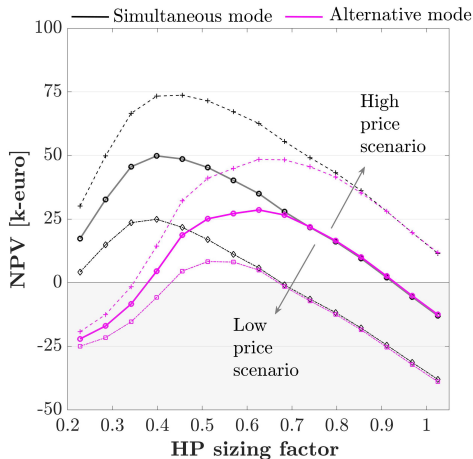
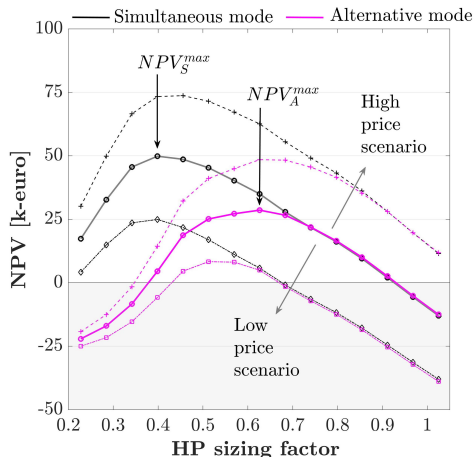


Figura: NPV in funzione della taglia della PdC e dei differenti scenari economici.

$$\text{HP sizing factor} = \frac{\dot{Q}_{HP,nom}}{\dot{Q}_{load}^{max}}$$

- funzionamento alternativo maggiormente influenzato dallo scenario economico
- presenza di un fattore di taglia critico oltre il quale le due strategie di controllo diventano equivalenti

Analisi di sensitività al prezzo dell'energia elettrica.

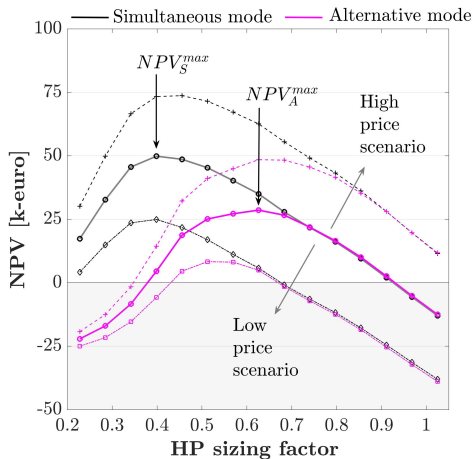


$$\text{HP sizing factor} = \frac{\dot{Q}_{HP,nom}}{\dot{Q}_{load}^{max}}$$

- $NPV_S^{max} \sim 1.5 NPV_A^{max}$
- High price scenario
 $\Rightarrow -50\% NPV_S^{max}$
- Low price scenario
 $\Rightarrow +50\% NPV_S^{max}$

Figura: NPV in funzione della taglia della PdC e dei differenti scenari economici.

Analisi di sensitività al prezzo dell'energia elettrica.



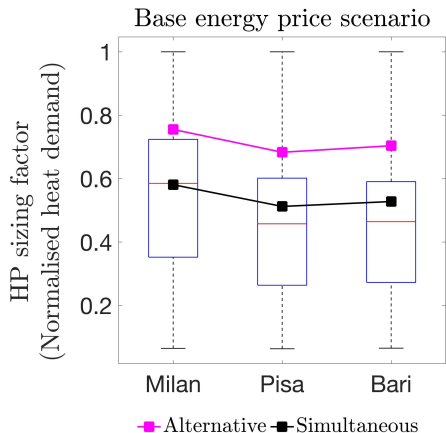
$$\text{HP sizing factor} = \frac{\dot{Q}_{HP,nom}}{\dot{Q}_{load}^{max}}$$

- $NPV_S^{max} \sim 1.5 NPV_A^{max}$
- High price scenario
 $\Rightarrow -50\% NPV_S^{max}$
- Strategia controllo simultanea: fattore di taglia poco sensibile allo scenario economico.

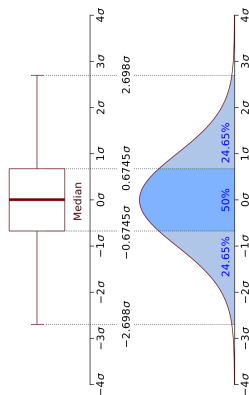
Figura: NPV in funzione della taglia della PdC e dei differenti scenari economici.

Analisi di sensitività alle condizioni climatiche.

Fattori di taglia ottimi (marker all'interno dei box plots nella figura a sinistra)

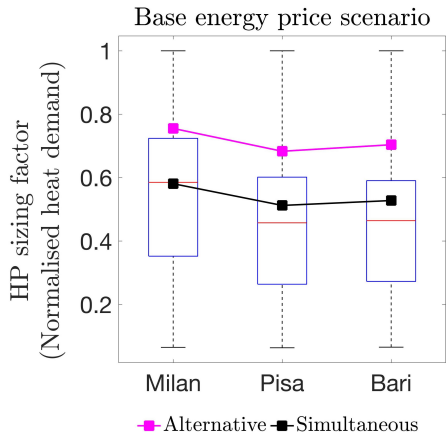


$$\text{normalised heat demand} = \frac{\dot{Q}_{load}}{\dot{Q}_{load}^{max}}$$



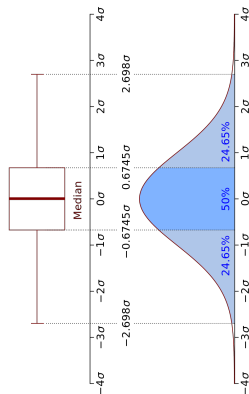
Analisi di sensitività alle condizioni climatiche.

Fattori di taglia ottimi (marker all'interno dei box plots nella figura a sinistra)



- Rapporto fattori di taglia \sim costante

$$\text{normalised heat demand} = \frac{\dot{Q}_{load}}{\dot{Q}_{load}^{max}}$$



Conclusioni

È possibile identificare, sulla base di tale metodologia, linee guida progettuali?

Sì. Indicazione progettuale \Rightarrow il fattore di dimensionamento della pompa di calore rimane pressoché costante rispetto al carico, indipendentemente dalla zona climatica e dallo scenario di prezzo.

Qual è l'impatto della strategia di controllo ottimizzata sul dimensionamento ottimo di sistemi ibridi?

Il dimensionamento ottimale risulta influenzato dal tipo e livello di cooperazione esistente tra i due generatori. La modalità di funzionamento simultanea consente di sottodimensionare (-20%) la PdC, e di incrementare al contempo la sua utilizzazione.

Conclusioni

Può un utente beneficiare in termini di costi di investimento e costi operativi dall'applicazione di tale strategia?

Sì. Nel caso benchmark analizzato i risultati indicano che l'ottimizzazione del design (dimensionamento + controllo) del sistema consente di beneficiare di risparmi in termini di costi (-40%) e consumi di energia primaria (-42%), a fronte di un payback period di 9 anni. Inoltre, l'analisi mostra che la modalità di funzionamento simultanea richiede un minore investimento iniziale e fornisce maggiori risparmi sul costo dell'energia (+6%), un maggiore NPV (+55%) ed un minore tempo di ritorno dell'investimento rispetto alla modalità di funzionamento alternativa, che invece è la modalità maggiormente presente sul mercato.

Lavoro 2: Obiettivi & Research questions

Obiettivo

Analisi controllori predittivi in sistemi dotati di accumulo termico

Research questions

Esiste un dimensionamento ottimo della capacità di accumulo?

Qual è il legame tra la capacità di accumulo ottimale e la capacità predittiva?

Descrizione del sistema

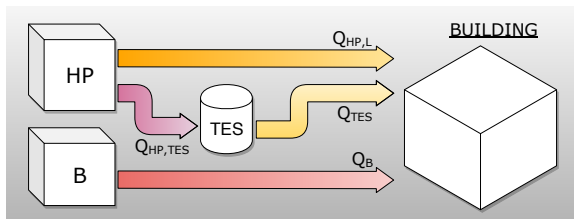


Figura: Sistema ibrido con accumulo.

- Maggiore flessibilità nell'azione di controllo (Load shifting)
- Possibilità di sfruttare le condizioni di generazione più favorevoli alla PdC (es. momenti della giornata con temperature esterne più elevate)

Descrizione del sistema

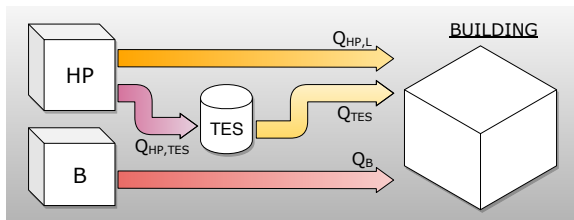
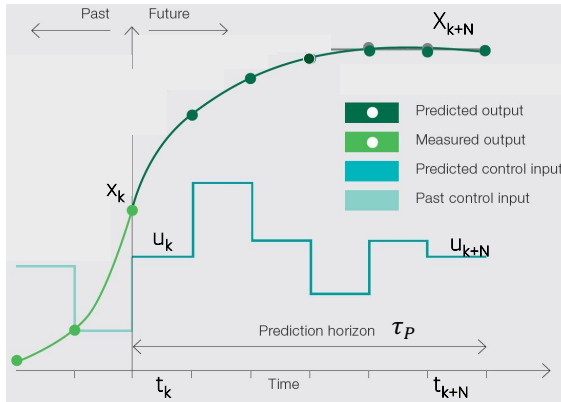


Figura: Sistema ibrido con accumulo.

- Maggiore flessibilità nell'azione di controllo (Load shifting)
- Possibilità di sfruttare le condizioni di generazione più favorevoli alla PdC (es. momenti della giornata con temperature esterne più elevate)
- Maggiore complessità nell'ottimizzazione della gestione del sistema
- Tecniche avanzate di controllo: RBC \rightarrow MPC

Ottimizzazione della strategia di controllo

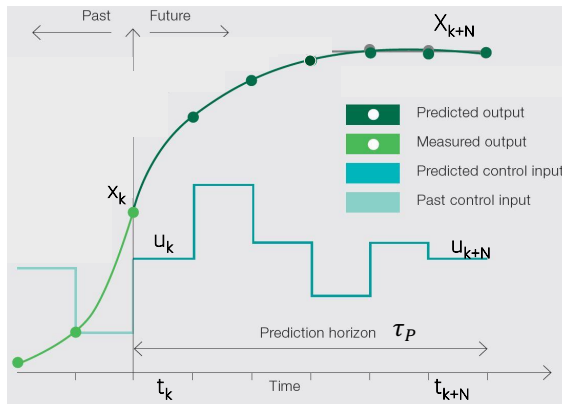
Controllo predittivo (Model Predictive Control - MPC) per la gestione ottima del sistema ibrido + accumulo termico.



- Step 1: soluzione problema di controllo ottimo sull'orizzonte di predizione τ_P

Ottimizzazione della strategia di controllo

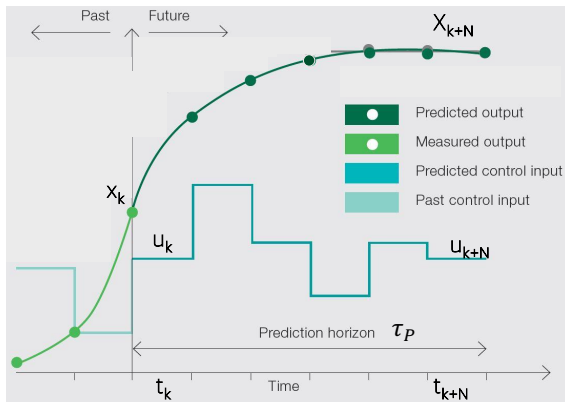
Controllo predittivo (Model Predictive Control - MPC) per la gestione ottima del sistema ibrido + accumulo termico.



- Step 1: soluzione problema di controllo ottimo sull'orizzonte di predizione τ_P
- Step 2: Implementazione del primo elemento della sequenza di controllo ottima (u_k)

Ottimizzazione della strategia di controllo

Controllo predittivo (Model Predictive Control - MPC) per la gestione ottima del sistema ibrido + accumulo termico.



- Step 1: soluzione problema di controllo ottimo sull'orizzonte di predizione τ_P
- Step 2: Implementazione del primo elemento della sequenza di controllo ottima (u_k)
- Step 3: Evoluzione del sistema al time step successivo e ritorno allo Step 1

Modellazione PdC

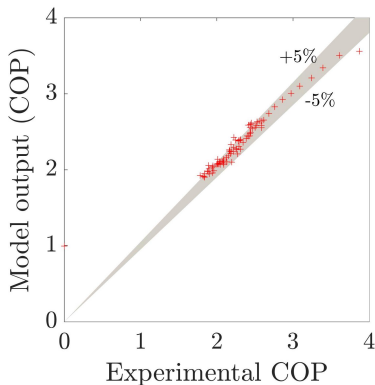
Modello PdC sviluppato sulla base di dati raccolti durante una campagna sperimentale su una PdC da 8 kW utilizzata in un sistema ibrido da Immergas S.p.A.

Modello

$$COP = \eta^{II}(LF, \beta) \cdot COP_{Carnot}$$

$$LF = \frac{\dot{Q}_{HP}}{\dot{Q}_{HP}^{max}}$$

$$\beta = \frac{T_{supp}}{T_{ext}}$$



Applicazione metodologia

| Parameters | Value |
|---------------------------|-------|
| Peak Load demand [kW] | 6 |
| Daily Energy demand [kWh] | 91.2 |
| HP nominal power [kW] | 8 |
| Boiler nominal power [kW] | 6 |
| Boiler efficiency | 0.96 |
| ρ_{el} [€/kWh] | 0.2 |
| ρ_{gas} [€/kWh] | 0.08 |

- Profilo sinusoidale per T_{ext} : $T_{ext}^{media} = 8.5^{\circ}C$,
 $= 6.5^{\circ}C$
- Scenario base: sistema ibrido senza accumulo

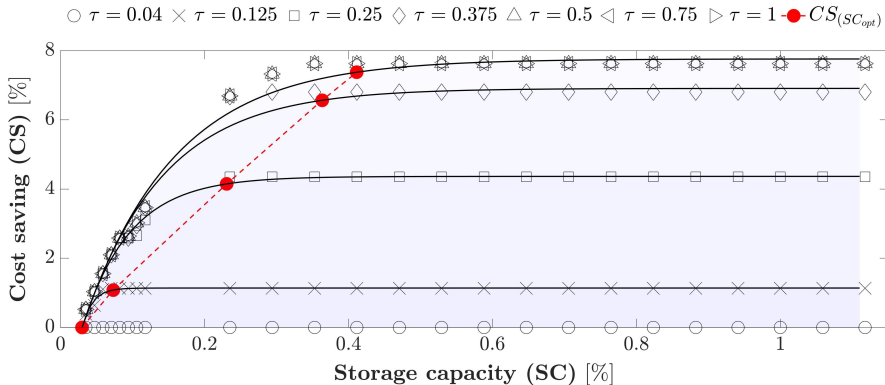
Obiettivi analisi

- Cost-saving
integrazione accumulo
- Link tra capacità di accumulo e orizzonte predittivo

Analisi di sensitività

- Isolamento accumulo
- Profilo T_{ext}
- Efficienza generatori/prezzi energia

Impatto della finestra predittiva e della capacità di accumulo sul cost-saving rispetto allo scenario base



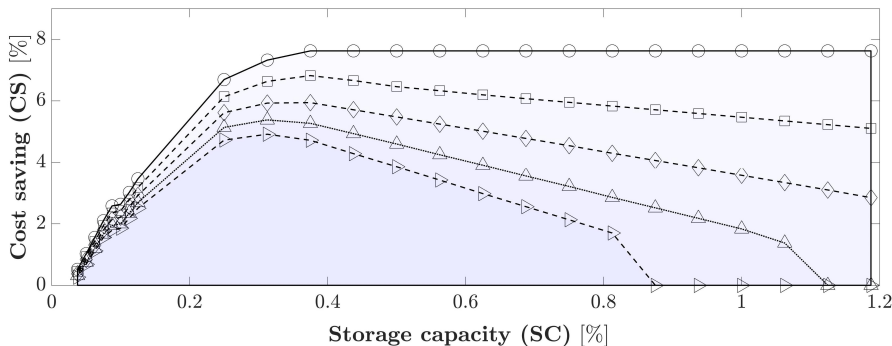
$$SC = E_{TES}^{max} / E_{load}^{daily}, \quad \tau = \tau_P / 24$$

linea rossa \Rightarrow capacità di accumulo ottimali

Impatto delle perdite di accumulo sul cost-saving nello scenario di riferimento (RS)

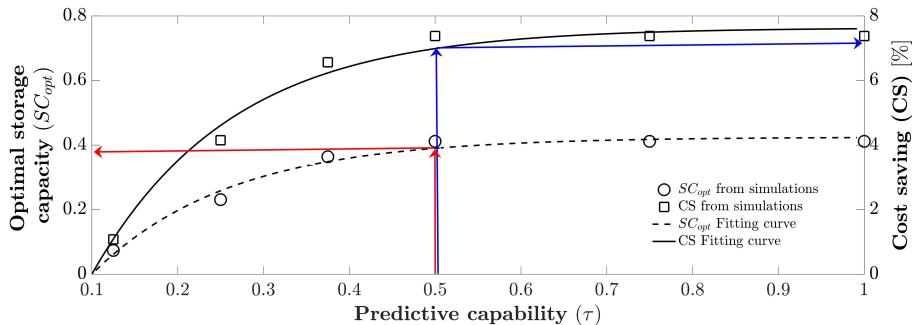
Orizzonte predittivo: $\tau = 0.5$ (12h)

○ 0% losses □ 3% losses ◇ 5% losses △ 8% losses ▷ 10% losses



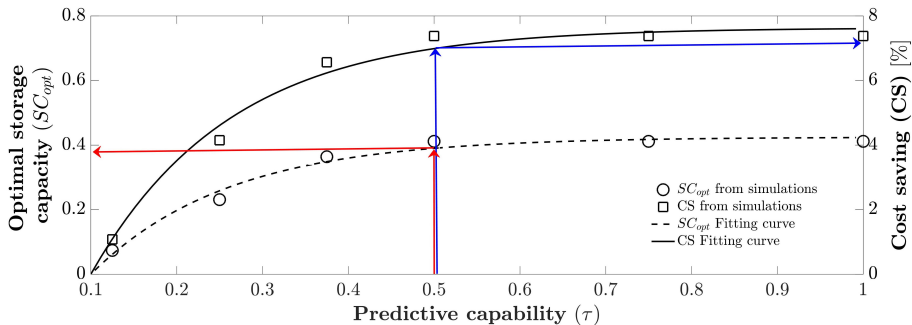
$$SC = E_{TES}^{max} / E_{load}^{daily}, \quad \tau = \tau_P / 24$$

Sintesi correlazioni per la scelta della finestra predittiva/capacità di accumulo



- Fissata la capacità predittiva \rightarrow identifico la capacità di accumulo ottimale ed il rispettivo cost-saving

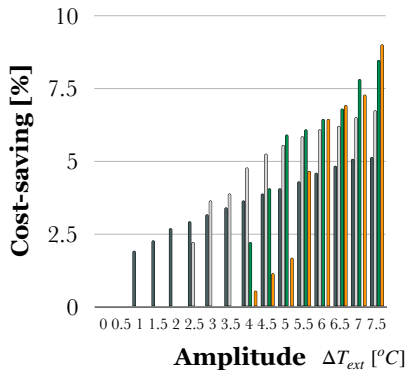
Sintesi correlazioni per la scelta della finestra predittiva/capacità di accumulo



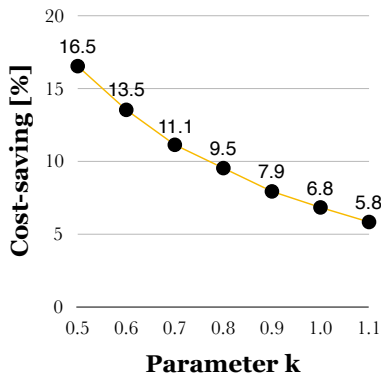
- Fissata la capacità predittiva → identifico la capacità di accumulo ottimale ed il rispettivo cost-saving
- Scelta la capacità di accumulo → identifico l'orizzonte predittivo ottimale ed il rispettivo cost-saving

Analisi sensitività ai prezzi dell'energia/efficienza dei generatori

$$\mathcal{J} = \frac{p_{\text{gas}}}{\eta_B} \sum_{k=1}^{\mathcal{TP}} \left[\kappa \frac{p_{\text{el}}}{p_{\text{gas}}} \frac{\eta_B}{\text{COP}_{L,k}} \cdot \dot{Q}_{\text{HP},k} + \dot{Q}_{B,k} \right] \cdot \Delta t \quad (\text{Funzione obiettivo OCP})$$



■ $\bar{T}_{\text{ext}} = 5.5^\circ\text{C}$ □ $\bar{T}_{\text{ext}} = 7^\circ\text{C}$ ■ $\bar{T}_{\text{ext}} = 8.5^\circ\text{C}$ ■ $\bar{T}_{\text{ext}} = 10^\circ\text{C}$



Conclusioni

Esiste un dimensionamento ottimo della capacità di accumulo? Qual è il legame tra la capacità di accumulo ottimale e la capacità predittiva?

Efficacia del sistema di accumulo nel ridurre i costi di gestione del sistema tramite implementazione di strategie di load-shifting

Esistenza correlazione tra capacità di accumulo e orizzonte predittivo.

Correlazione utile tool per il dimensionamento di tali sistemi:

→ evita sovradimensionamento dell'accumulo (minori costi)

Pubblicazioni

D'Ettorre F., Conti P., Schito E., Testi D., “*Model predictive control of a hybrid heat pump system and impact of the prediction horizon on cost-saving potential and optimal storage capacity*”, Applied Thermal Engineering 148 (2019) 524–535, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.063>

Lavoro 3: Obiettivi & Research questions

Obiettivo

Identificazione metodologie di valutazione della flessibilità energetica fornita da sistema ibrido + accumulo in presenza di misure di Demand-Response.

Impatto di un sistema di accumulo termico sui costi associati a misure di DR.

Misure di Demand-Response (DR)

Attivazione richiesta DR in funzione dei prezzi dell'energia elettrica:
 Se $p_{el} > p_{el}^{thld}$ si richiede una modulazione (α) della potenza elettrica
 assorbita dalla PdC: $P_{el,HP} \rightarrow \alpha \cdot P_{el,HP}$

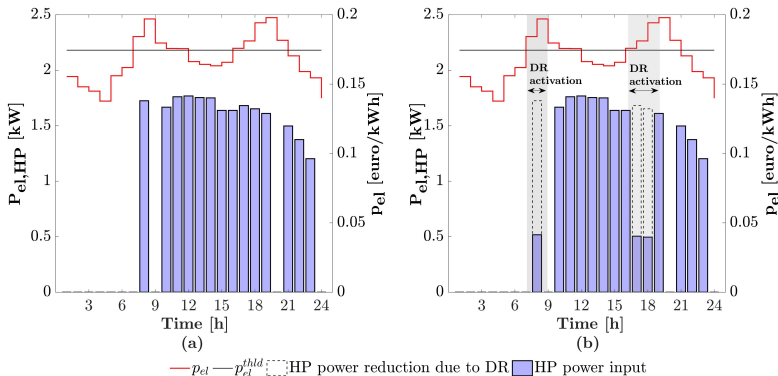


Figura: Potenza assorbita PdC: Senza DR (a); con DR (b).

Caso studio e metriche proposte

| Parameter | Units | Value |
|------------------------------------|----------------|-------|
| Peak demand \dot{Q}_{load}^{max} | kW | 6 |
| Heat pump size | kW | 4 |
| Boiler size | kW | 6 |
| Boiler efficiency | - | 0.96 |
| TES size | m ³ | 0.5 |

Tabella: Caratteristiche generatori e carico.

- Scenario riferimento: no DR
- Ottimizzazione non-lineare

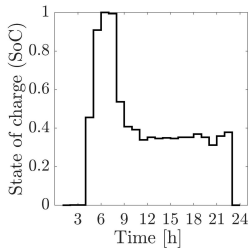
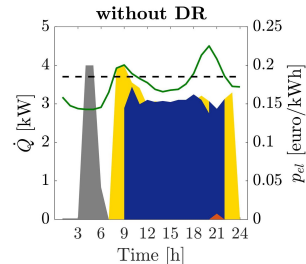
Metriche

- Δ costi operativi

$$\delta C_{Flex} = OC_{DR} - OC_{ref}$$
- costo specifico DR

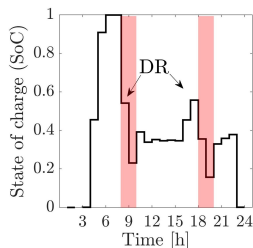
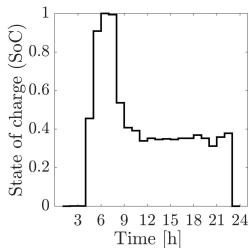
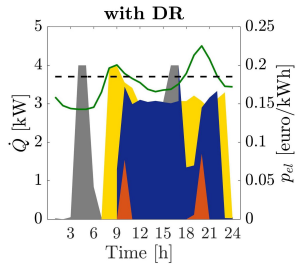
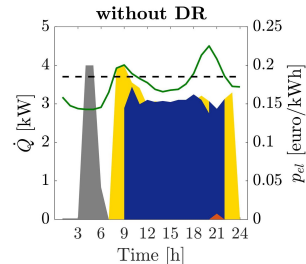
$$C_{Flex} = \delta C_{DR} / \delta E_{DR}$$

Risultati: strategia di controllo ottima



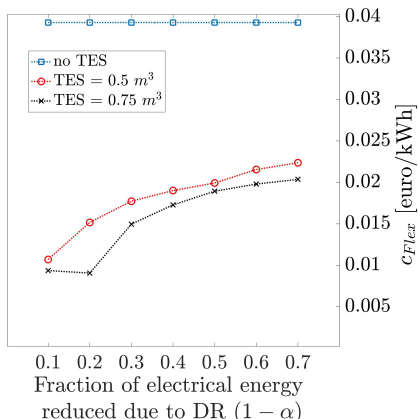
HP to TES
 HP to Load
 TES to Load
 Boiler to Load
 - - - p_{el}^{thld}
— p_{el}

Risultati: strategia di controllo ottima



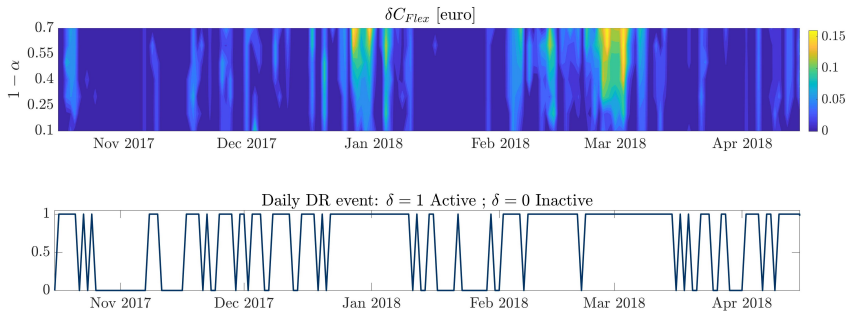
HP to TES
 HP to Load
 TES to Load
 Boiler to Load
 - - - p_{el}^{thld}
— p_{el}

Risultati: costi associati alle misure di DR implementate



Efficacia dell'accumulo nel ridurre il costo associato al servizio di DR fornito.

Risultati: Mappa dei costi associati alle azioni di DR ($TES = 0.5 \text{ m}^3$)



Conclusioni

Impatto del sistema di accumulo

I risultati mostrano l'efficacia delle strategie di load shifting che è possibile implementare grazie alla presenza del sistema di accumulo nel ridurre i costi associati al servizio di DR fornito.

Nel caso analizzato i costi specifici della misura di DR vengono ridotti del 45% con un accumulo di 0.5 m^3 e del 75% con un accumulo di 0.75 m^3 .

Metodologia per valutare le potenziale del sistema di fornire servizi di DR

La metodologia e gli indicatori sviluppati consentono di stimare le potenzialità che il sistema ibrido + accumulo hanno nel fornire servizi di DR.

Tali informazioni, possono essere utilizzate per:

- strutturare meccanismi di incentivazione;
- valutare le potenzialità offerte in termini di energy flexibility da un aggregato di edifici ed identificare la migliore combinazione di azioni di DR da implementare per ciascuno di essi.

Conclusioni

Pubblicazioni

D'Ettorre F., De Rosa M., Conti P., Testi D., Finn D.P., “Mapping the energy flexibility potential provided by residential buildings equipped with optimally-controlled heat pump, gas boilers and thermal storage”, *Sustainable Cities and Society* 50 (2019), 101689, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101689>.

D'Ettorre F., De Rosa M., Conti P., Schito E., Testi D., Finn D.P., “Economic assessment of flexibility offered by an optimally controlled hybrid heat pump generator: a case study for residential building”, *Energy Procedia*, 148 (2018) 1222–1229, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.008>

Sviluppi futuri

- 1 Applicazioni di tecniche di ottimizzazione sotto incertezza per valutare:
 - ⇒ impatto sul controllo/dimensionamento dei generatori del sistema ibrido;
 - ⇒ impatto dimensionamento del sistema di accumulo.
- 2 Verifica sperimentale delle logiche di controllo sviluppate;
- 3 Analisi della gestione ottima del sistema ibrido in presenza di FER (accoppiamento con fotovoltaico o solare termico);
- 4 Estensione dell'analisi condotta sul tema dell'Energy Flexibility su scale maggiori (aggregati di edifici).

Grazie per l'attenzione!