



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

EMILIA ROMAGNA
anci

**STRATEGIE DI ELETTRIFICAZIONE DEI
CONSUMI TERMICI NEGLI EDIFICI ESISTENTI**

CLUST-ER
GREENTECH
ENERGIA E SOSTENIBILITÀ

Con il patrocinio del  Comune
di Bologna

CLUST-ER
BUILD
EDILIZIA E COSTRUZIONI

BOLOGNA | AUDITORIUM BIAGI
MERCOLEDÌ 11 OTTOBRE 2023 ORE 14.30 – 17.30
PIAZZA NETTUNO 3

Pompe di calore nelle ristrutturazioni: verifiche dei consumi post-intervento

Ing. Matteo Dongellini

Dipartimento di Ingegneria Industriale

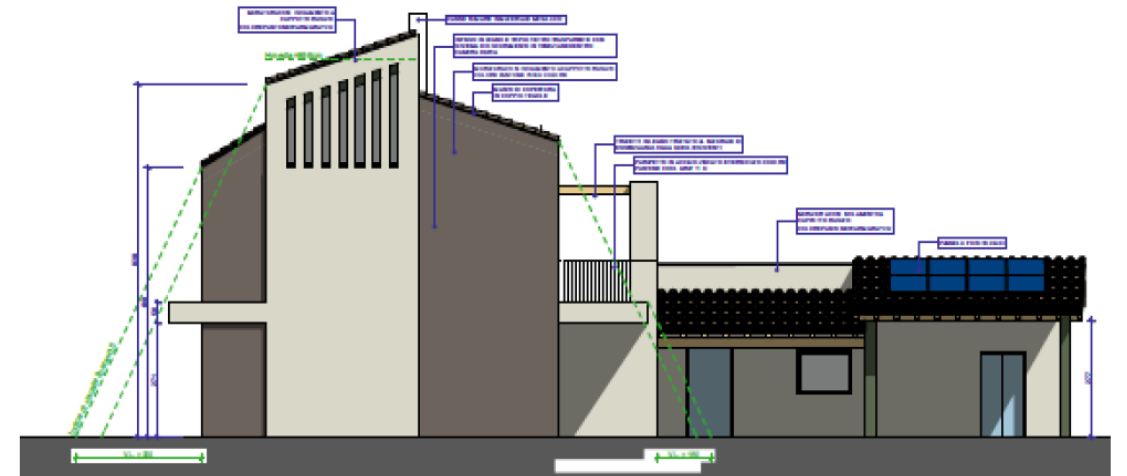
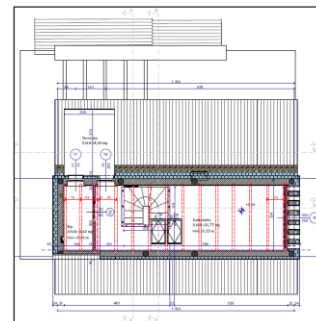
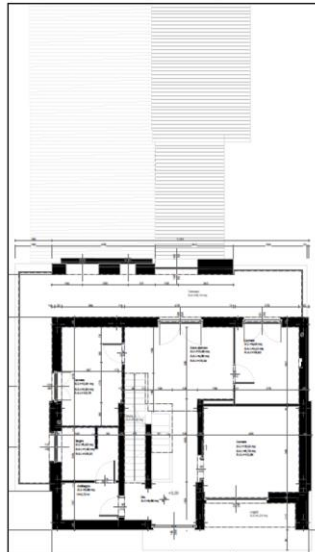
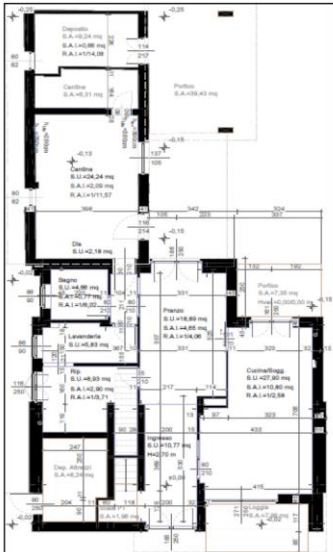
Agenda

- **Ristrutturazione villetta mono-familiare**
- **Ristrutturazione grande condominio**
- **Sistema di monitoraggio edificio scolastico di nuova costruzione**



Ristrutturazione villetta mono-familiare

- **Demolizione e ricostruzione**
- Anno intervento: **2016**
- Sito: **Novi di Modena**
- **3 piani**
- Superficie utile riscaldata: **157 m²**
- Volume lordo riscaldato: **500 m³**
- Rapporto S/V: **0.88 m⁻¹**



Ristrutturazione villetta mono-familiare

Edificio pre-esistente

- Involucro edilizio in mattoni forati senza isolamento
- Impianto di riscaldamento e produzione ACS basato su caldaia a gas tradizionale (no raffrescamento, no fonti rinnovabili)

- Radiatori in ghisa e termostati di zona

- Prestazioni impianto:

- Fabbisogno energetico riscaldamento: 48232 kWh (gas naturale)
- Fabbisogno energetico produzione ACS: 3158 kWh (gas naturale)
- $EP_{gl,nren}$: 343.7 kWh/m²anno (classe energetica F)



Ristrutturazione villetta mono-familiare

Edificio post-intervento: **involucro edilizio molto performante**

- **Pareti perimetrali con laterizio e isolamento esterno a cappotto con lastre di EPS**

Spessore da 40 a 68 cm, *trasmittanza da 0.112 a 0.224 W/m²K*

- **Pavimento controterra con sottofondo alleggerito isolato**

Spessore 50 cm, *trasmittanza 0.174 W/m²K*

- **Copertura isolata con lastre di fibra di legno**

Spessore 35 cm, *trasmittanza 0.167 W/m²K*

- **Finestre con triplo vetro 8-16-4-22-8 con telaio in legno e veneziane incorporate**

$U_{\text{vetro}} = 0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U_{\text{telaio}} = 0.88 \text{ W/m}^2\text{K}$, *fattore solare (con tende) = 0.205*



Ristrutturazione villetta mono-familiare

- Impianto HVAC con molti componenti
- Ampio sfruttamento **fonti rinnovabili**
- **Solo energia elettrica**



Pannelli radianti



Collettori solari e
Impianto fotovoltaico 4.05 kW_p



Ventilazione meccanica
controllata a flussi incrociati



Pompa di calore reversibile aria-acqua



Deumidificatore

Ristrutturazione villetta mono-familiare



Pompa di calore reversibile aria-acqua per riscaldamento, raffrescamento, produzione ACS (potenza termica nominale = 11 kW, COP nominale = 4.19)

Ventilazione meccanica controllata con recuperatore sensibile a flussi incrociati ($\eta = 84\%$), portata 125 m³/hr



3 deumidificatori, 24 l/giorno di condensa



2 collettori solari piani per produzione ACS ($A = 1.8 \text{ m}^2$, $\eta_0 = 0.783$, $\alpha_1 = 4.25 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_2 = 0.0057 \text{ W/m}^2\text{K}^2$)



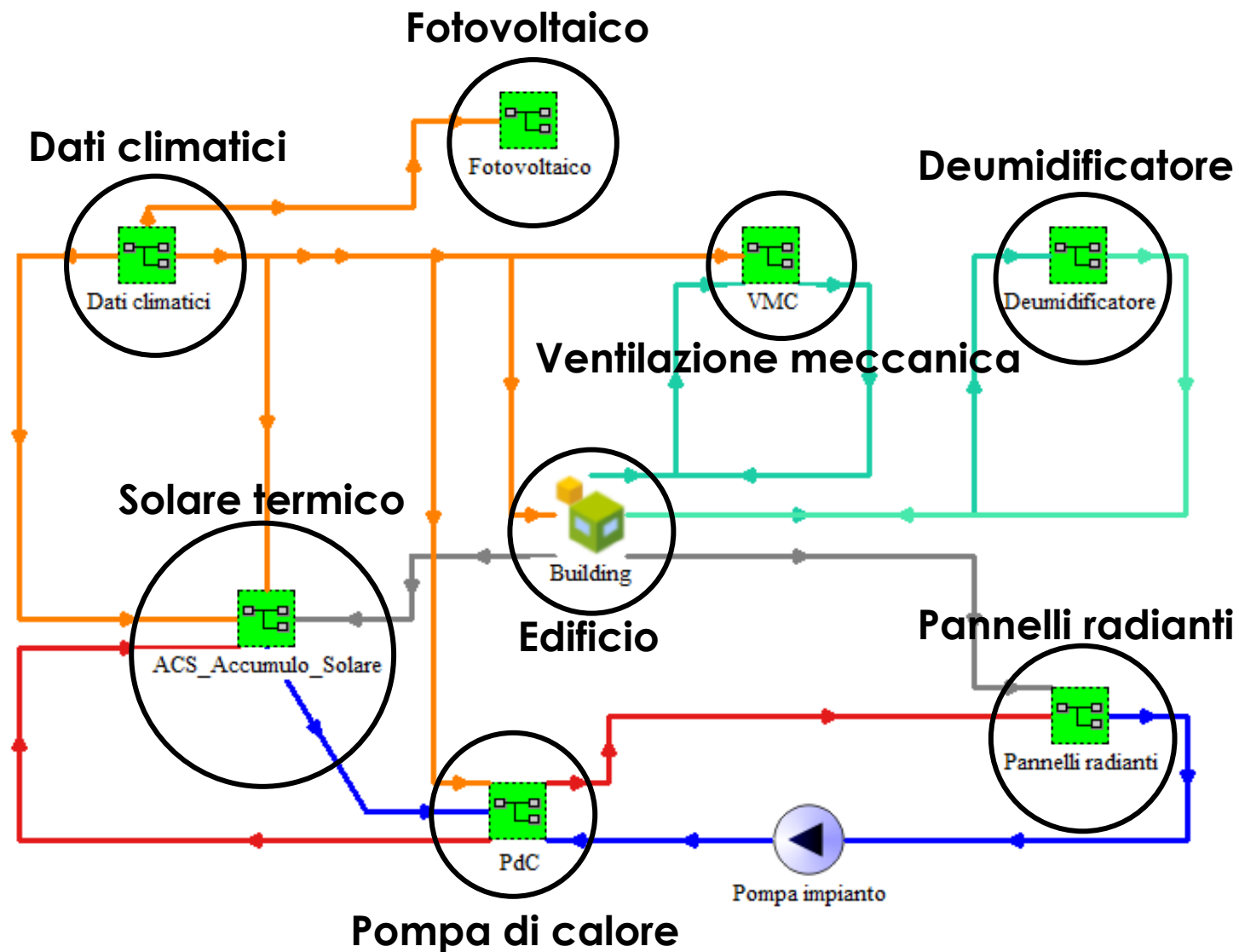
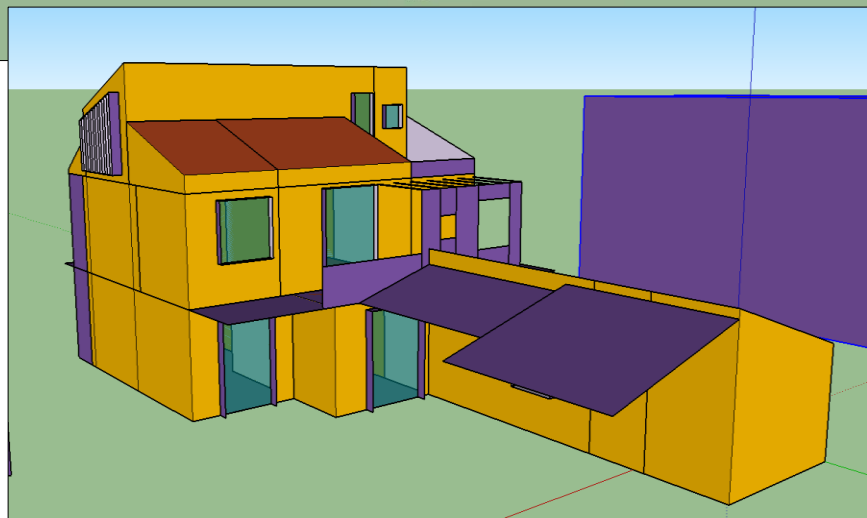
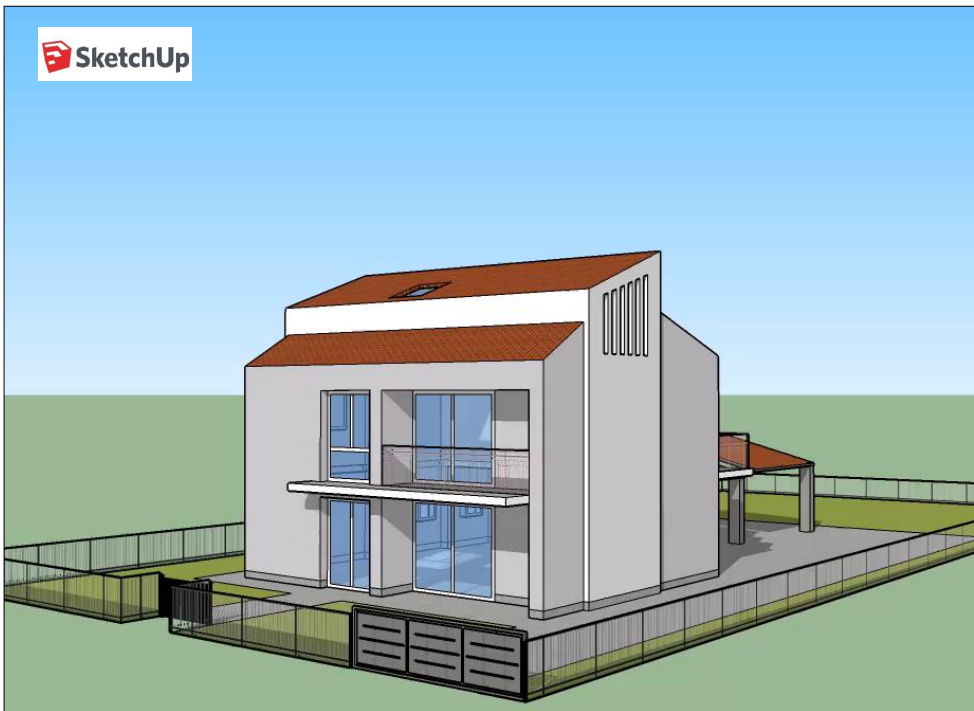
Pannelli radianti

Impianto fotovoltaico 4.05 kW_p (15 moduli di silicio policristallino)



Ristrutturazione villetta mono-familiare

Modello di simulazione energetica dinamica con **TRNSYS**



Ristrutturazione villetta mono-familiare



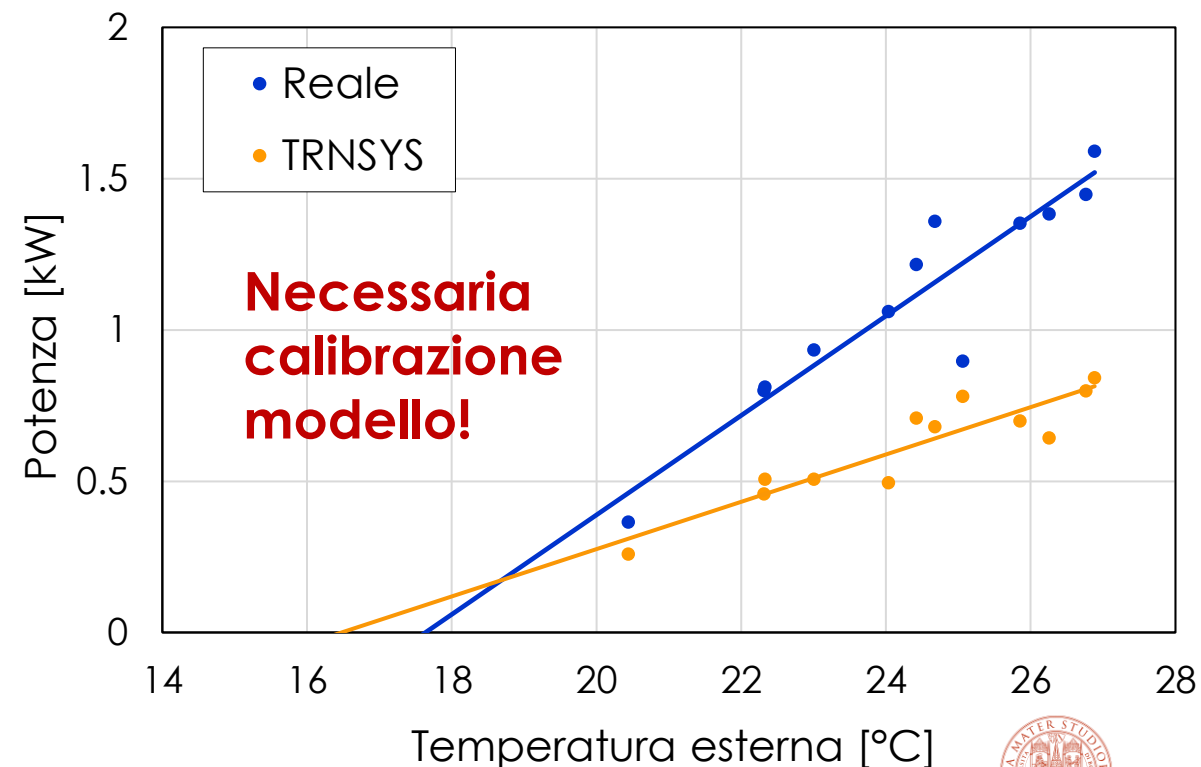
Campagna di monitoraggio

25/04/17 - 31/10/17

Risultati modello dinamico vs Risultati monitoraggio

	Reali	TRNSYS	Differenza
Consumo elettrico totale edificio [kWh]	4862	3443	-29 %
Produzione FV [kWh]	2874	2998	+4.3 %
Prelievi [kWh]	3157	1676	-47 %
Immissioni in rete [kWh]	1169	1231	+5.3 %
Autoconsumo [kWh]	1705	1767	+3.6 %

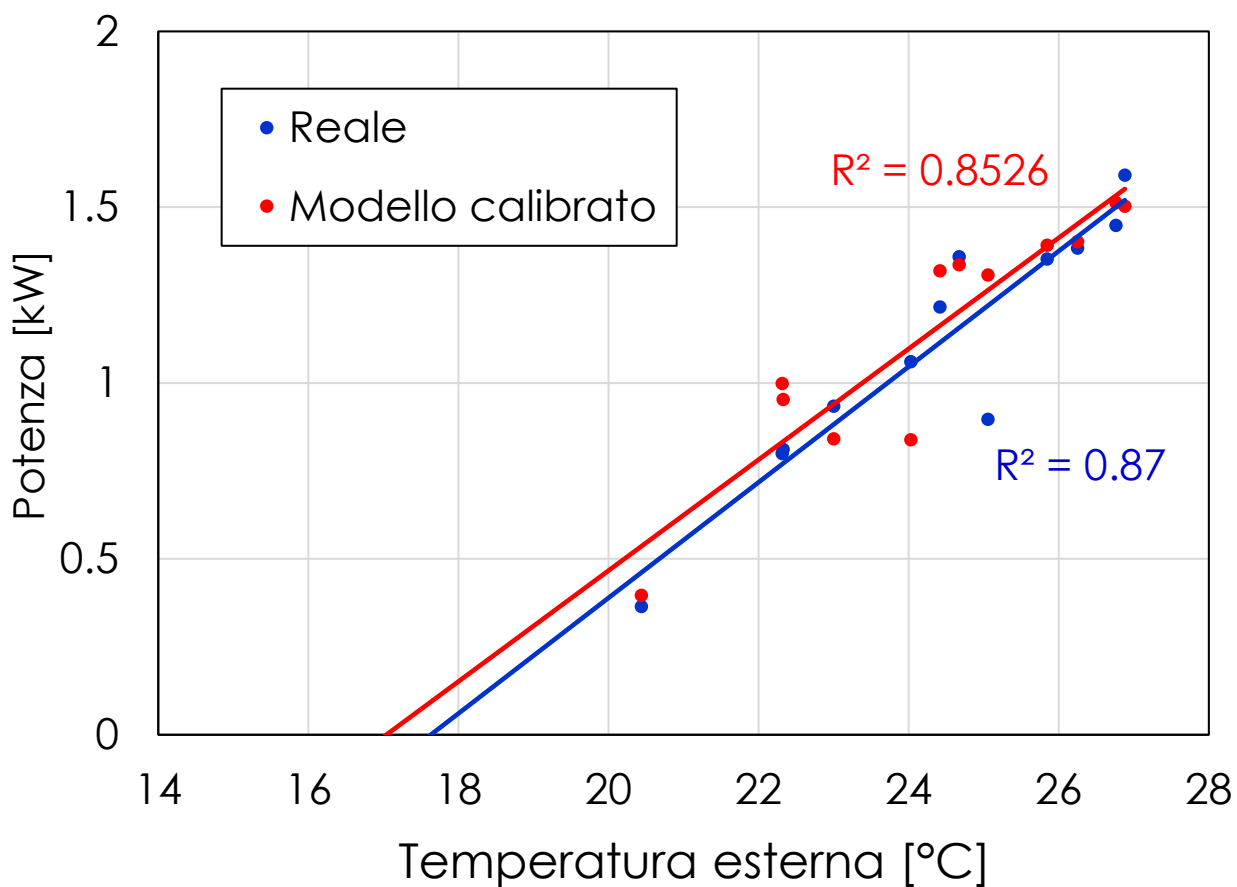
Confronto tra firme energetiche



Ristrutturazione villetta mono-familiare



Calibrazione modello: regolazione impianto, efficienza dispositivi, elettrodomestici



	Reali	Modello calibrato	Differenza
Consumo elettrico totale edificio [kWh]	4862	4699	-3.8%
Produzione FV [kWh]	2874	2998	+4.3%
Prelievi [kWh]	3157	2913	-7.7%
Immissioni in rete [kWh]	1169	1211	+3.6%
Autoconsumo [kWh]	1705	1786	+4.7%

Modello calibrato

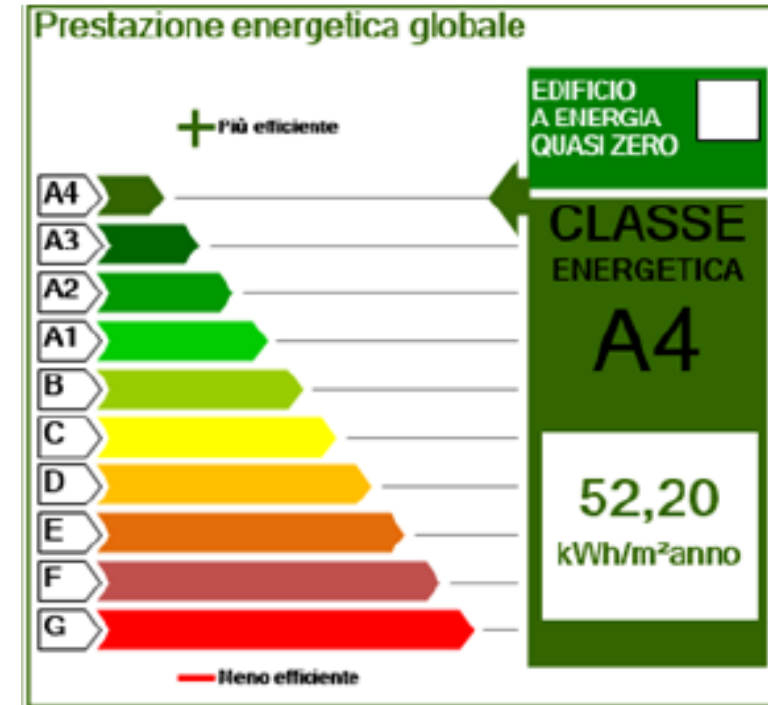


Ristrutturazione villetta mono-familiare



Prestazioni impianto post-intervento

Consumi elettrici riscaldamento [kWh]	4020
Consumi elettrici raffrescamento [kWh]	0
Consumi elettrici produzione ACS [kWh]	1072
Consumi elettrici ventilazione [kWh]	203
Consumi elettrici totali impianto [kWh]	5295



$EP_{gl,nren}$: 52.2 kWh/m²anno



-85% rispetto alla situazione pre-esistente
($EP_{gl,nren}$: 343.7 kWh/m²anno)



Ristrutturazione villetta mono-familiare



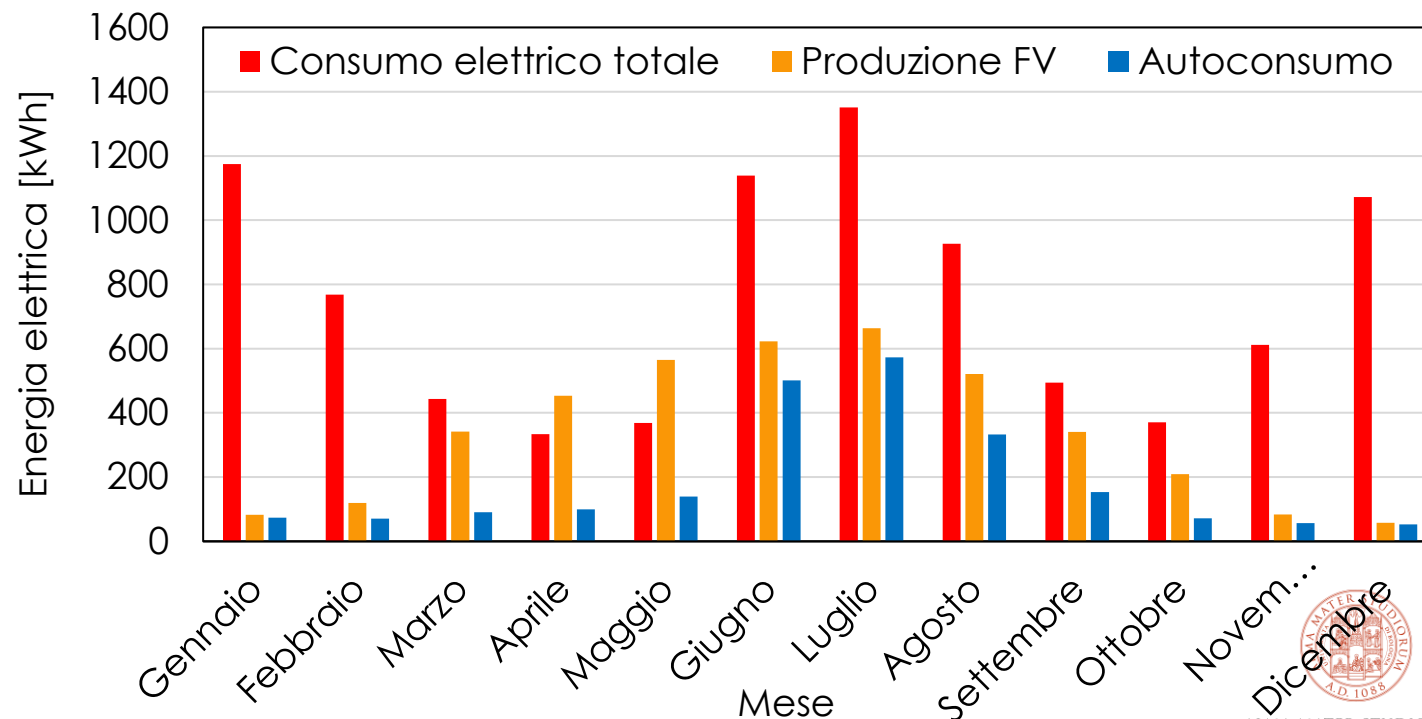
Risultati annuali

Consumo elettrico totale [kWh]	9053 (con elettrodomestici)
Produzione fotovoltaica [kWh]	4060
Prelievi da rete [kWh]	6841
Immissioni in rete [kWh]	1846
Autoconsumo [kWh]	2212



$$\frac{\text{Autoconsumo}}{\text{Produzione FV}} = 54\%$$

$$\frac{\text{Autoconsumo}}{\text{Consumo elettrico totale}} = 24\%$$



Ristrutturazione condominio



Interventi su involucro edilizio:

- **Isolamento solaio esterno e solaio del porticato** con 105 mm di EPS
- Sostituzione infissi con **finestre a doppio vetro e telaio taglio termico** ($U_w = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$)

- Costruzione: **anni '60**
- Via Mercadante (Bologna)
- **7 piani**
- **27 appartamenti**
- Superficie utile: **3825 m²**
- Volume riscaldato: **11477 m³**

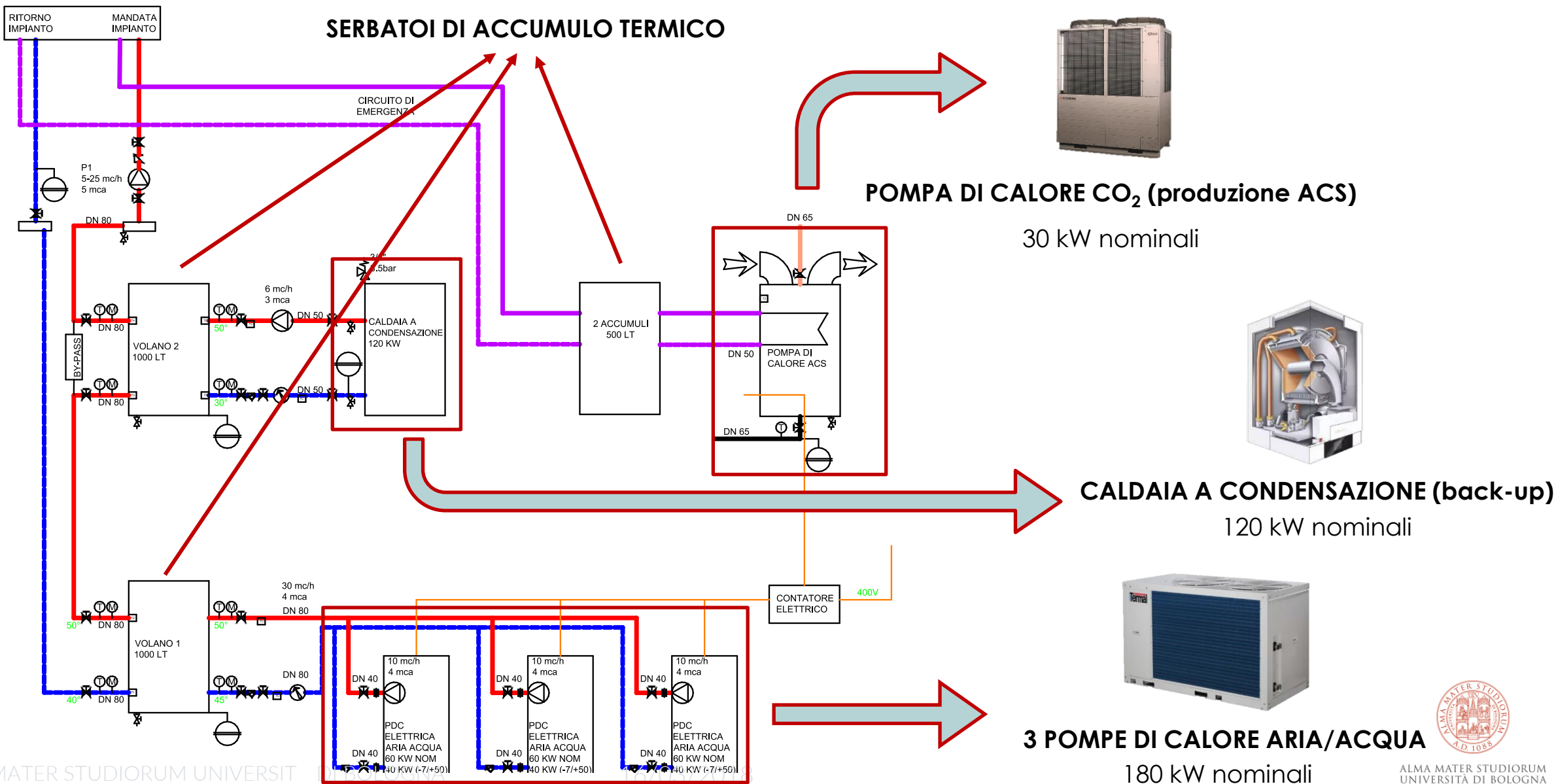
Interventi su impianto di riscaldamento:

- Installazione **radiatori a bassa temperatura** con **valvole termostatiche**
- **Sostituzione del vecchio generatore di calore**

- $\eta_{\text{caldaia}} = 93 \%$
- $\eta_{\text{gl,imp}} = 72,5 \%$
- $P_u = 466 \text{ kW}$



Ristrutturazione condominio: rinnovamento centrale termica

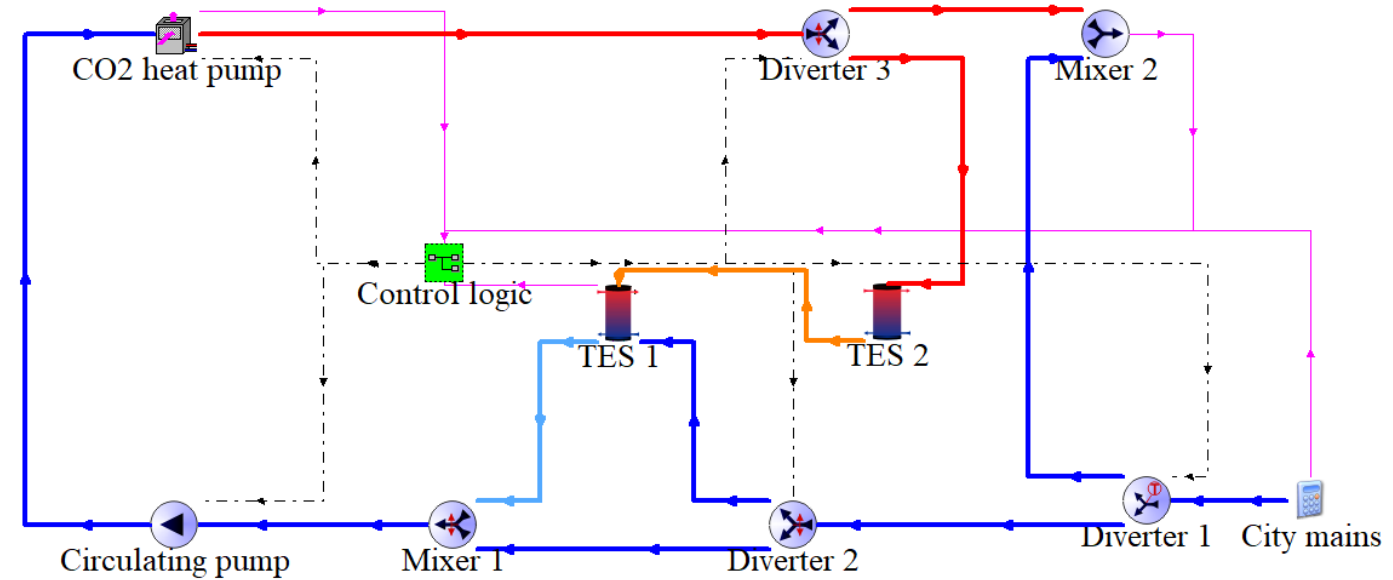
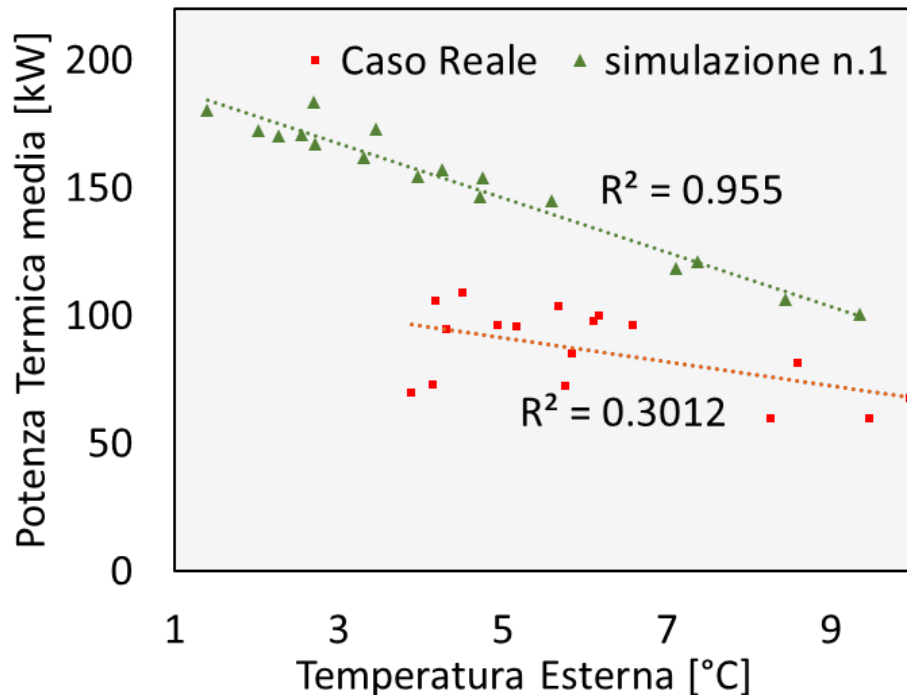


Ristrutturazione condominio

Modello di simulazione
energetica dinamica con **TRNSYS**



Necessario calibrare il modello!



Campagna di monitoraggio in centrale termica dal
24 Novembre 2017 al 17 Febbraio 2018 (85 giorni)

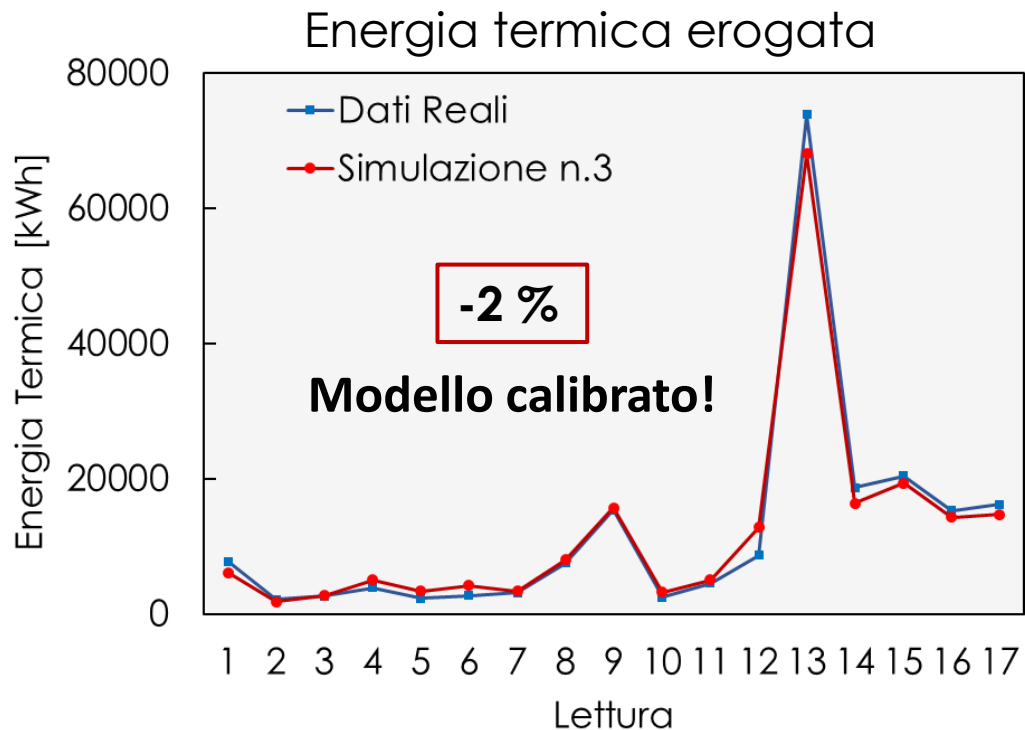
- **Energia termica erogata** pompe di calore e caldaia
- Fabbisogno **gas** caldaia
- Fabbisogno **en. elettrica** pompe di calore
- **Temperatura acqua** (mandata generatori, serbatoi di accumulo)



Ristrutturazione condominio

Calibrazione del modello di simulazione secondo EN 15603 - impianto di riscaldamento

- **Modifiche su modello edificio** (trasmittanza, infiltrazioni, apporti interni, T interna)
- Modifica **logica di regolazione** impianto
- Modifica **prestazioni pompe di calore e caldaia**



Pompe di calore riscaldamento

Q_{erogato} [kWh]	E_{el} [kWh]	SCOP_{net}
261837	118312	2.21

Caldaia

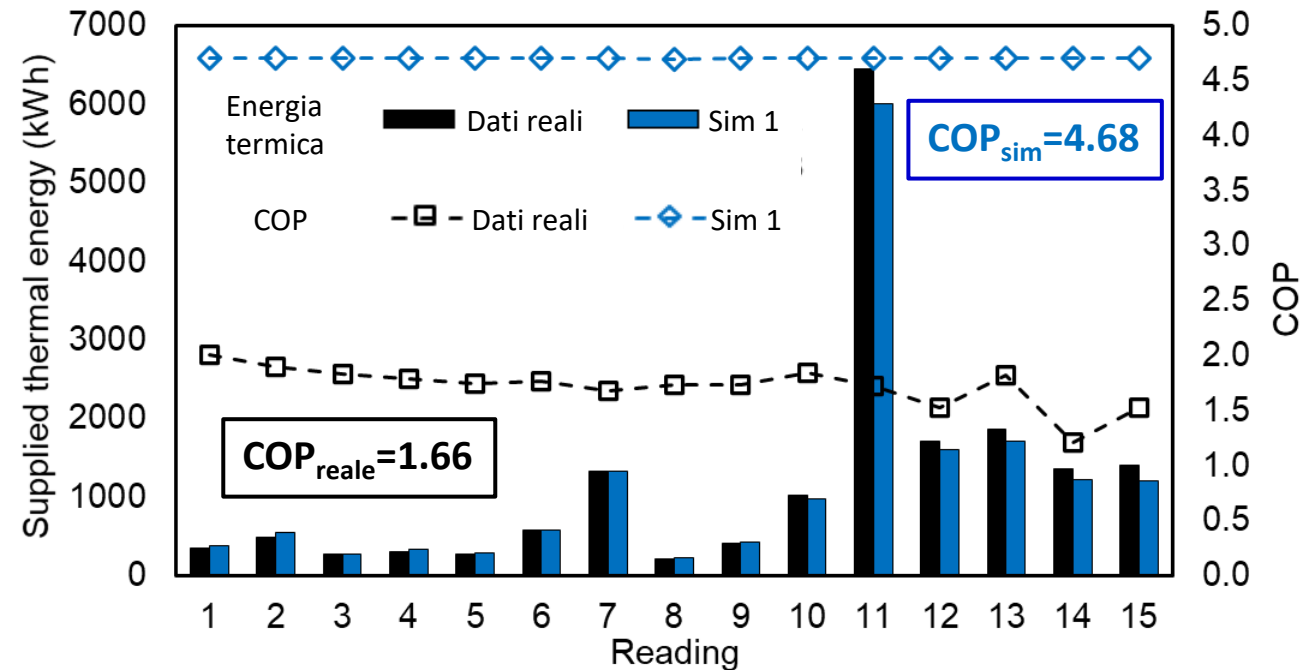
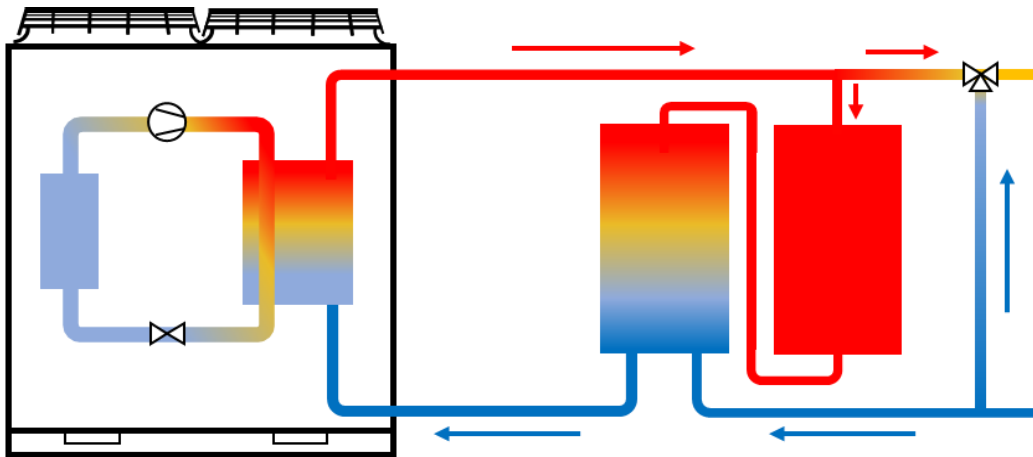
Q_{erogato} [kWh]	\dot{m} gas [Sm ³]	η caldaia
2823	285.6	1.03

- **Caldaia eroga 2% fabbisogno:** ottimo dimensionamento e regolazione impianto
- **Basse prestazioni pompe di calore:** alta T di mandata (50°C)
- **$EP_{\text{H,nren}}$: 61.2 kWh/m²anno (-62%)**



Ristrutturazione condominio – impianto di produzione ACS

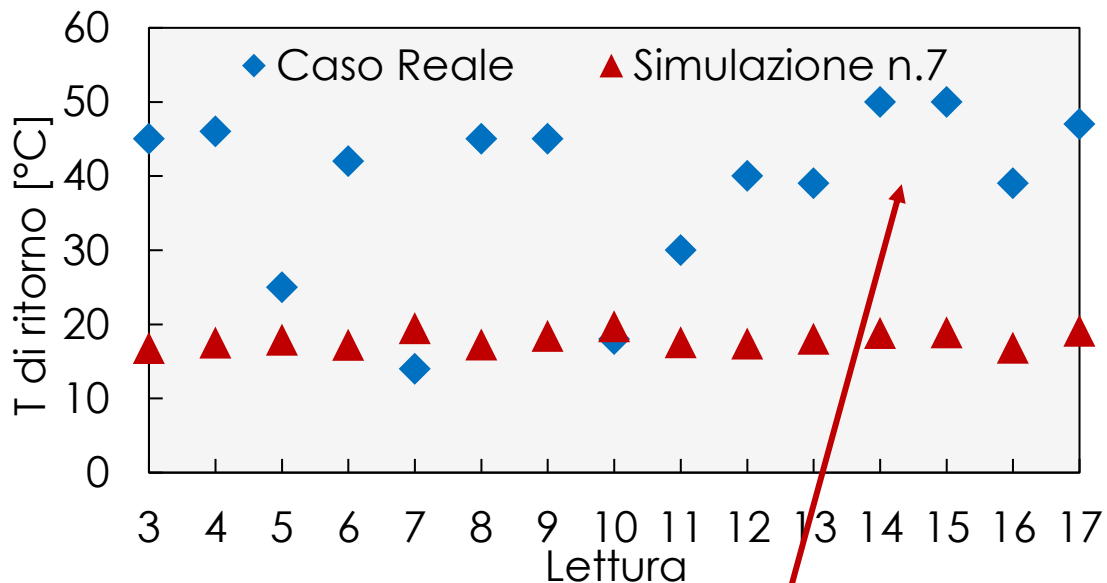
Pompa di calore a CO₂ aria-acqua, 30 kW potenza termica nominale, COP nominale: 4.70, 2 serbatoi di accumulo da 500 litri in serie



- Modello **calibrato** in termini di **energia termica erogata**
- **Prestazioni PdC molto basse**: circa 1/3 di quelle teoriche!

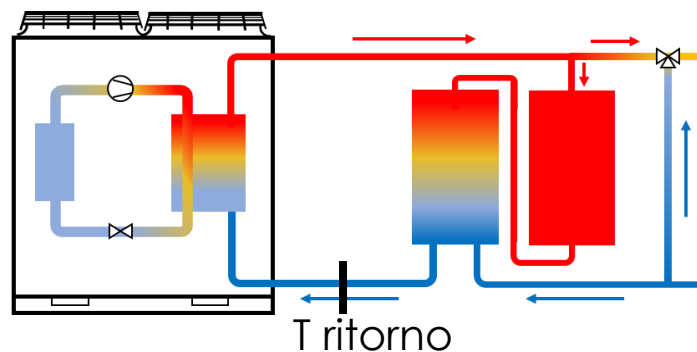


Ristrutturazione condominio – impianto di produzione ACS

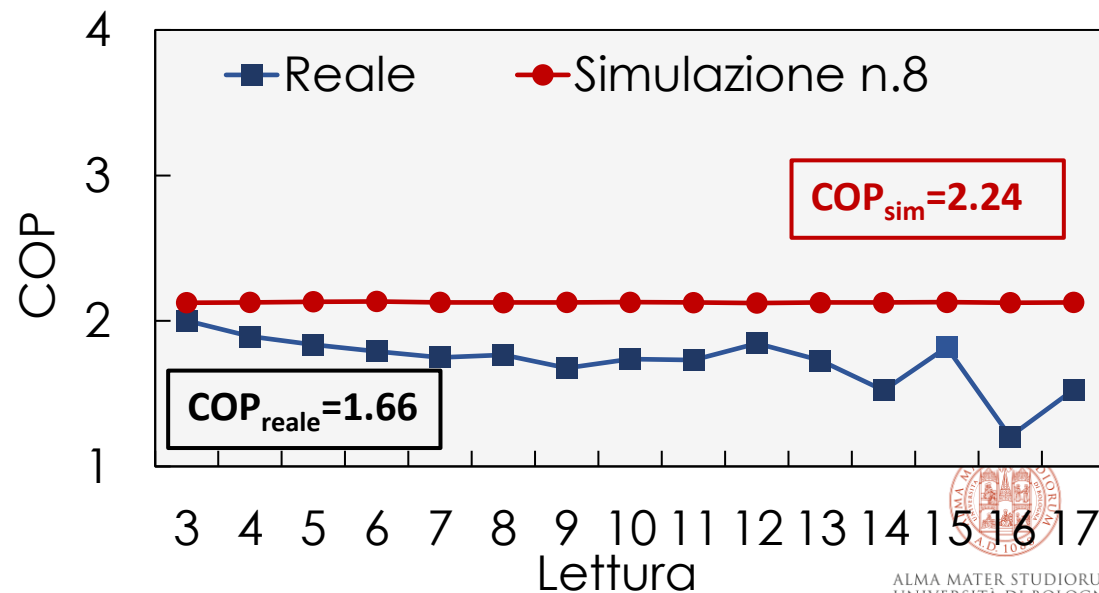


Temperatura di ritorno in PdC molto alta (fino a **50°C**): causa delle basse prestazioni della PdC
Stratificazione termica negli accumuli non garantita nell'impianto: portate squilibrate, portata rete ricircolo elevata

Necessario monitoraggio continuo prestazioni impianto e dimensionamento corretto di tutti gli elementi!



Trascurando la stratificazione negli accumuli si ottengono risultati molto simili



Sistema di monitoraggio edificio scolastico

Nuova Scuola Media «Antonio Brancati», Pesaro

Inaugurazione: **14 Settembre 2020**

2 piani, 19 aule (circa 500 alunni)

Certificazione LEED Platino (88/110)

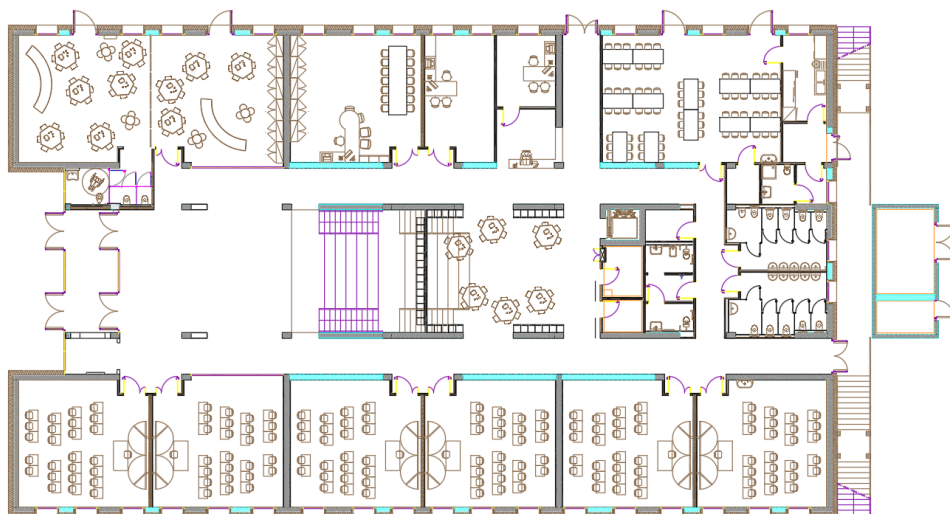


Superficie utile riscaldata	Volume lordo riscaldato
4058 m ²	10680 m ³



Sistema di monitoraggio edificio scolastico

Involucro edilizio altamente performante



Elemento involucro	Trasmittanza termica (W/m ² K)
Pareti perimetrali	0.13 - 0.17
Pavimento controterra	0.13
Copertura esterna	0.10
Solaio interpiano	0.57

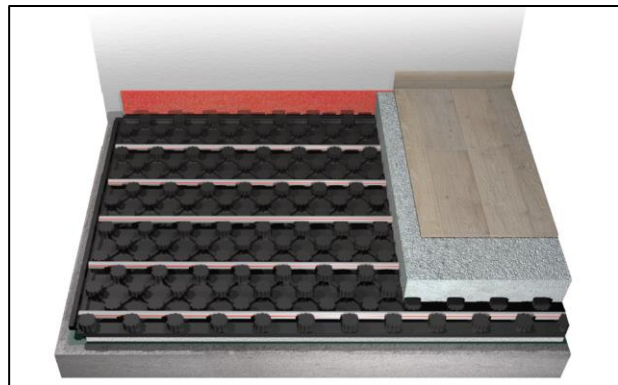
Elementi trasparenti : **triplo vetro 4/16/5/16/4** con **Argon**, telaio **legno-alluminio**, fattore solare **0.30**, trasmittanza ≈ 1 W/m²K



Sistema di monitoraggio edificio scolastico



96 moduli silicio monocristallino (28.9 kW_p)



Pannelli radianti



UTA



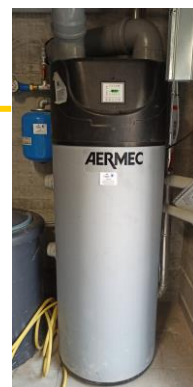
2x PdC climatizzazione

$P_{T_nom} = 135.7 \text{ kW}$

$P_{F_nom} = 113.5 \text{ kW}$



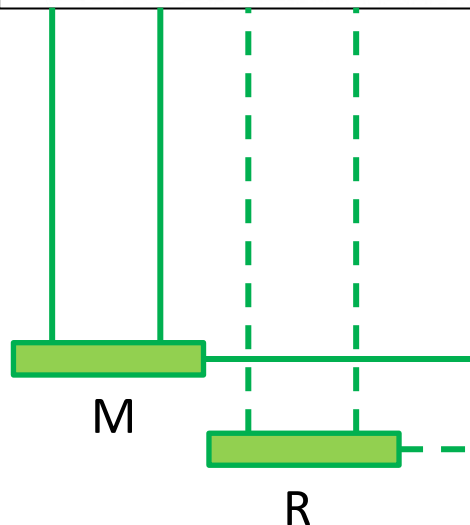
Accumulo
1000 l



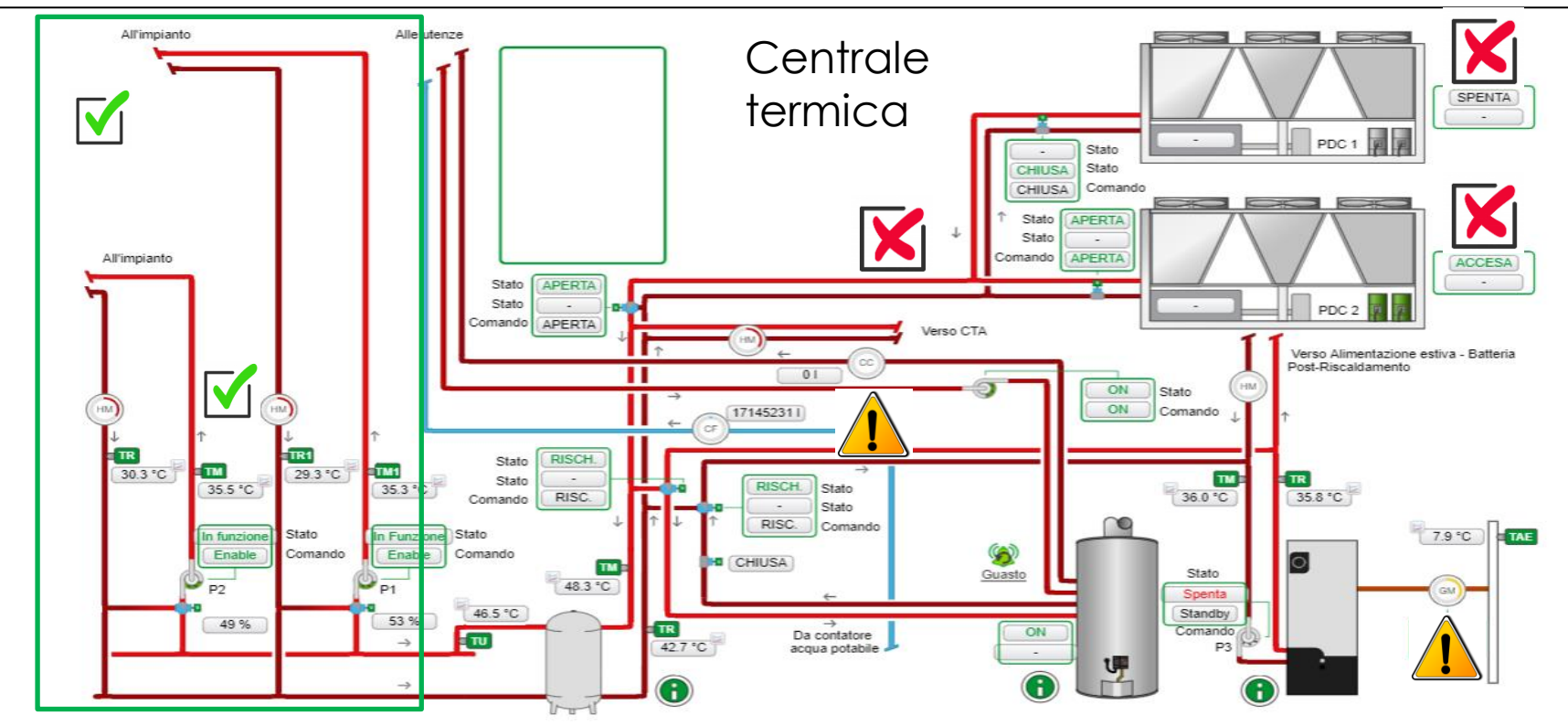
PdC per produzione ACS



Caldaia back-up
 $P_{nom} = 152.2 \text{ kW}$



Sistema di monitoraggio edificio scolastico

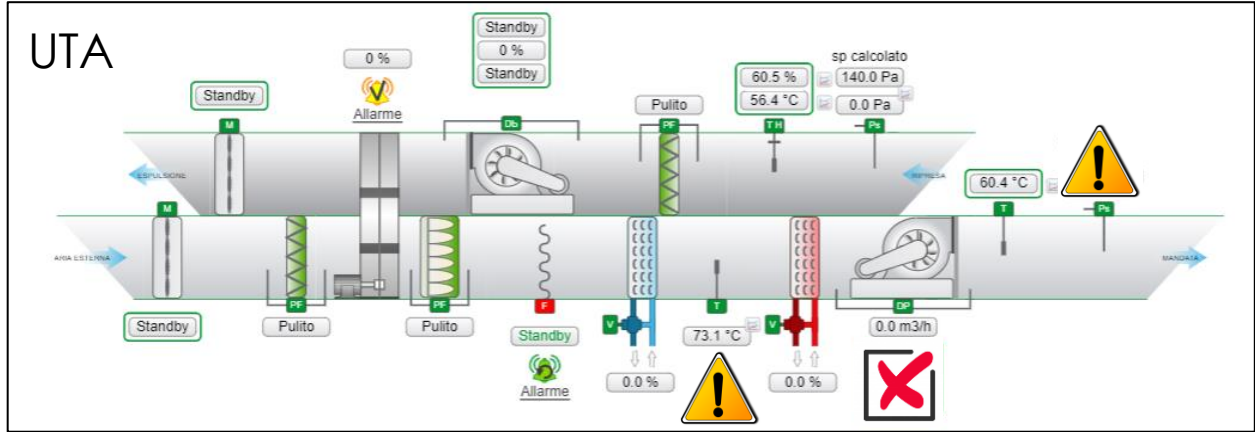


Assenze:

- En. termica erogata PdC
- En. elettrica assorbita PdC
- En. termica erogata caldaia
- Portata aria elaborata UTA
- Produzione fotovoltaico

Problemi:

- Sensori non calibrati
- Guasto contatore del gas
- Guasto contatore ACS
- Unità di misura



- ✓ Pannelli radianti
- ✓ Condizioni interne



Sistema di monitoraggio edificio scolastico

Indicazioni al gestore dell'impianto

- **Segnalazione errori** nel sistema, **mancanza monitoraggio di tutte le variabili**
- Il gestore dell'impianto ha effettuato le **modifiche** richieste nel corso del **2021**

Sviluppi futuri

- **Analisi in tempo reale** del corretto funzionamento impianto
- Possibilità di sviluppare **modelli energetici calibrati** per valutare modalità di regolazione ottimali



Conclusioni

- **Pompe di calore elettriche ottima soluzione per ristrutturazioni**, soprattutto se accoppiate a impianto fotovoltaico: ampio sfruttamento fonti rinnovabili, riduzione emissioni CO₂, riduzione bolletta, miglioramento classe energetica
- Anche la **sola sostituzione del generatore di calore può garantire risparmi energetici significativi (-60%)**
- Fondamentale **calibrare modelli di simulazione energetica** per effettuare valutazioni efficaci su miglioramento prestazioni impianto
- **Non basta installazione di macchine molto performanti**: necessaria analisi di tutti elementi impianto per evitare gravi inefficienze
- **Progettazione completa sistemi di monitoraggio** (monitorare prestazioni di ogni sottosistema dell'impianto) e **necessaria fase di test** del sistema





ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Grazie per l'attenzione!

Ing. Matteo Dongellini

Ricercatore a Tempo Determinato tipo A
Dipartimento di Ingegneria Industriale

matteo.dongellini@unibo.it

www.unibo.it